



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



# RegEnerA: Regeneración de Energía en Ascensores

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Ignacio Irland, Gonzalo Moreira, Cristian Oxley

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA.

## TUTORES

Pablo Toscano ..... Universidad de la República  
Federico Arismendi ..... Universidad de la República

## TRIBUNAL

Ernesto Elenter ..... Universidad de la República  
Isabel Briozzo ..... Universidad de la República  
Mauricio Riera ..... Universidad de la República

Montevideo  
martes 17 agosto, 2021

*RegEnerA:*

*Regeneración de Energía en Ascensores*, Ignacio Irland, Gonzalo Moreira, Cristian Oxley.

Esta tesis fue preparada en  $\text{\LaTeX}$  usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 186 páginas.

Compilada el martes 17 agosto, 2021.

<http://iie.fing.edu.uy/>

Sean los orientales tan ilustrados como valientes.

JOSÉ GERVASIO ARTIGAS

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Agradecimientos

En primera instancia agradecemos a nuestras familias, amigos y allegados por el constante apoyo a lo largo de la realización del proyecto. En un año particular, lleno de incertidumbres y obstáculos, fue fundamental contar con el soporte incondicional de este grupo de personas.

A nuestros tutores, Pablo Toscano y Federico Arismendi, quienes confiaron desde el primer momento en nuestras capacidades para llevar a cabo el proyecto RegEnerA, brindándonos además conocimientos esenciales que nos permitieron enfrentar adversidades, siempre con un espíritu de libertad para tomar nuestras propias decisiones.

Un especial agradecimiento a Manuel Ríos, Juan Pablo Ríos, Dhustin Gonzalez, Carlos Azcune y a todo el equipo de Adamoli Ascensores, a quienes debemos gratitud no solo por permitirnos llevar a cabo el proyecto, sino también por la calidad de persona y la solidaridad inherente de todo el personal responsable cuya participación fue indispensable.

Por último, pero no menos importante, queremos destacar y agradecer la participación de cada agente integrante de la Facultad de Ingeniería, desde nuestros profesores que nos nutrieron con conocimientos y enseñanzas para afrontar distintas situaciones en nuestra etapa universitaria, hasta nuestros compañeros y futuros colegas, quienes se convirtieron en nuestra segunda familia y en un pilar fundamental que nos brindó estabilidad y contención en momentos de necesidad.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

*A nuestras familias.*

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Resumen

La regeneración de energía en ascensores es un fenómeno que va *in crescendo* con el paso del tiempo. El ascensor, sistema de transporte vertical, constituye un gran porcentaje del uso diario de energía eléctrica en edificios, cercano al 10%.

En ciertos escenarios de carga, el motor del ascensor actúa como generador, generando potencia que se disipa en forma de calor en resistencias. Resulta esencial buscar distintos métodos que ayuden a recuperar la energía que, de otra forma, se perdería.

Poder regenerar energía implica no solo un ahorro económico al reducir costos de energía, sino que también implica un impacto medioambiental positivo, al reducir gases nocivos para el planeta, debido a una menor generación eléctrica.

Este proyecto tiene el objetivo de exponer los aspectos positivos de la regeneración de energía eléctrica en sistemas de automoción vertical, específicamente ascensores. Para ello, el lector hará un recorrido por los distintos métodos de regeneración que se encuentran vigentes en la actualidad; sus ventajas y desventajas, haciendo foco en los aspectos económicos, pero sin perder perspectiva de las mejoras medioambientales.

Se realizará un exhaustivo análisis energético en base a datos recabados en distintos ensayos realizados en varios ascensores de la ciudad de Montevideo. Esto permitirá realizar un modelo completo del ascensor, de manera que, mediante una simulación y una interfaz gráfica desarrollada, se pueda generalizar dicho modelo que represente los requerimientos del usuario.

Al finalizar la lectura, se discute la viabilidad de instalar dispositivos regenerativos en los ascensores de Montevideo, y se estima el tiempo de recuperación de la inversión.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Prefacio

El proyecto nace en el año 2020 junto al origen de la pandemia a causa de COVID-19. Esto fue, sin lugar a duda, el mayor obstáculo que se tuvo que superar. El avance tecnológico permitió aminorar los efectos sobre el proyecto, pero la transición no fue perfecta.

Quien haya experimentado algo similar, entenderá cómo esto influye en la realización de un proyecto en conjunto.

Dicho esto, queremos dar la certeza de que el proyecto se llevó a cabo de manera fiel a la idea original, y para ello fue trascendental la unión en el equipo formado.

RegEnerA

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Tabla de contenidos

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Prefacio</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Ascensores con accionamiento eléctrico</b>	<b>5</b>
3.1. Componentes . . . . .	5
3.1.1. Sistema de suspensión . . . . .	6
3.1.2. Engranajes . . . . .	8
3.1.3. Motor . . . . .	9
3.1.4. Variador de frecuencia . . . . .	10
3.1.5. Reductor de poleas . . . . .	11
3.2. Clasificación . . . . .	12
<b>4. Modelo mecánico y dinámica del ascensor</b>	<b>13</b>
4.1. Modelo mecánico . . . . .	13
4.1.1. Primera aproximación al modelo mecánico . . . . .	13
4.1.2. Segunda aproximación al modelo mecánico . . . . .	16
4.2. Dinámica del ascensor . . . . .	20
<b>5. Métodos Regenerativos</b>	<b>25</b>
5.1. Supercondensadores . . . . .	25
5.2. Regeneración con SC . . . . .	27
5.2.1. Flujo de energía . . . . .	28
5.2.2. Convertidor DC-DC Bidireccional . . . . .	29
5.2.3. Motor de Imanes Permanentes . . . . .	31
5.3. Baterías . . . . .	31
5.3.1. Baterías de litio . . . . .	31
5.3.2. Baterías de estado sólido . . . . .	32
5.4. Inversores de Interconexión a la Red . . . . .	32
5.4.1. Principio de Funcionamiento . . . . .	33

## Tabla de contenidos

5.4.2. Control . . . . .	34
5.4.3. Filtro . . . . .	35
<b>6. Dispositivos de regeneración de energía.</b>	<b>37</b>
6.1. ERS 2G . . . . .	37
6.2. AVRy . . . . .	38
6.3. Yaskawa R1000 . . . . .	39
6.4. Yaskawa D1000 . . . . .	39
<b>7. Campaña de mediciones</b>	<b>41</b>
7.1. Presentación de los edificios estudiados . . . . .	42
7.1.1. Edificio #1 . . . . .	42
7.1.2. Edificio #2 . . . . .	43
7.1.3. Edificio #3 . . . . .	43
7.2. Implementación del automatismo para el guardado de las medidas	44
7.3. Procesamiento de las medidas . . . . .	45
7.3.1. Análisis de la curva de velocidad . . . . .	46
7.3.2. Análisis de la potencia de salida del variador . . . . .	50
7.3.3. Análisis del torque de referencia . . . . .	52
7.3.4. Sentido de giro del motor . . . . .	53
7.3.5. Pisos recorridos y matriz de distancias acumuladas . . . . .	54
7.3.6. Variación del torque a lo largo de un viaje . . . . .	56
7.3.7. Cálculo de las pérdidas del sistema . . . . .	59
7.3.8. Determinación de la carga del ascensor . . . . .	65
7.3.9. Estimación del peso por persona . . . . .	69
7.4. Reporte de las medidas . . . . .	70
7.5. Medida de potencia con osciloscopio . . . . .	71
7.5.1. Medida de Voltaje . . . . .	72
7.5.2. Medida de corriente . . . . .	76
7.5.3. Dispositivo de medida . . . . .	80
7.5.4. Medida de Potencia . . . . .	80
<b>8. Simulación</b>	<b>87</b>
8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink . . . . .	87
8.1.1. Curvas de entradas . . . . .	88
8.1.2. Modelo eléctrico . . . . .	91
8.1.3. Modelo mecánico . . . . .	93
8.2. Interfaz gráfica . . . . .	102
8.2.1. Guía de Instalación . . . . .	103
8.2.2. Configuración . . . . .	104
8.2.3. Viajes a Simular . . . . .	105
8.2.4. Guía de Uso . . . . .	106
<b>9. Marco legal sobre microgeneración</b>	<b>111</b>
9.1. Normas uruguayas . . . . .	111
9.2. Normas internacionales . . . . .	113

<b>10. Análisis de las medidas</b>	<b>115</b>
10.1. Uso del ascensor . . . . .	115
10.2. Carga del ascensor . . . . .	119
10.3. Resultados energéticos . . . . .	121
<b>11. Estimación del consumo energético</b>	<b>125</b>
11.1. Matriz de energías . . . . .	125
11.2. Análisis de viajes y cargas . . . . .	127
11.3. Análisis económico . . . . .	129
11.3.1. Edificio #1 . . . . .	131
11.3.2. Edificio #2 . . . . .	132
11.3.3. Edificio #3 . . . . .	132
11.4. Análisis de supuestos . . . . .	134
11.4.1. Caso base . . . . .	134
11.4.2. Aumento de movilidad . . . . .	134
11.4.3. Cintas de acero . . . . .	135
11.4.4. Combinación de ambos supuestos . . . . .	136
11.4.5. Impacto medioambiental . . . . .	137
<b>12. Conclusiones</b>	<b>139</b>
<b>A. Marco legal sobre microgeneración</b>	<b>141</b>
A.1. Normas uruguayas . . . . .	141
A.2. Normas internacionales . . . . .	151
<b>Referencias</b>	<b>159</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>162</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>165</b>

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 1

## Introducción

En la actualidad, consumir energía de forma eficiente se ha convertido en una de las máximas prioridades para el ser humano, tanto desde una perspectiva económica como medioambiental. Un ahorro de energía implica no solo una reducción de los costos de energía, sino también un menor impacto en la polución debido a la disminución de emisión de dióxido de carbono, lo que contribuye al efecto invernadero. En consecuencia, ha aumentado la concientización de la población por desarrollar e incentivar políticas de ahorro energético. Este trabajo pondrá su foco en el ahorro de energía a nivel económico, pero siempre teniendo presente las ventajas ambientales como corolario.

A medida que la población de una ciudad aumenta, los terrenos adquieren un valor elevado y la ciudad comienza a crecer de forma vertical. Debido a esto, los ascensores toman un papel preponderante en cuanto al consumo de energía, que pocas veces es considerado como tal. Se estima que los edificios consumen alrededor del 40 % de la energía mundial, y los ascensores representan del 2 % al 10 % del consumo de energía de un edificio [1]. Durante las horas pico de uso, los ascensores pueden llegar a utilizar hasta el 40 % de la energía del edificio [1].

Históricamente, el ser humano ha entendido al ascensor como un mecanismo que le permitiría subir cargas pesadas a distintos niveles de altura; ejemplo son los egipcios, quienes desde el año 1500 aC utilizaban dispositivos basados en cuerdas y rampas para elevar bloques de piedras para construir pirámides [16].

Si bien no se tiene una cronología exacta de su primer aparición, a la fecha, la definición del ascensor como objeto ha tenido un gran avance, impulsado por las necesidades humanas y acompañado con un avance tecnológico importante. Tanto es así que, al día de hoy podemos encontrar ascensores de uso doméstico con grandes capacidades, con posibilidad de transportar cargas considerables a alturas muy elevadas, satisfaciendo todas las necesidades de comodidad del usuario; pero como todo suceso, tiene un coste, como se verá más adelante.

A grandes rasgos, el ascensor está formado por una cabina y un contrapeso unidos por un cable o cintas a través de una polea que es movida por un motor eléctrico. El ascensor está diseñado de forma tal que, cuando la cabina baja, el

## Capítulo 1. Introducción

contrapeso sube y viceversa.

Los tres elementos del ascensor que tienen mayor consumo son: el sistema de tracción, la iluminación de la cabina y el control de maniobra [21]. Es necesario entonces intentar reducir el consumo de las tres partes, por ejemplo utilizando iluminación de bajo consumo, particularmente LED, o utilizando un sistema de encendido automático, de forma tal que cuando el ascensor esté en modo de espera se pueda minimizar ese gasto innecesario. Varios estudios han demostrado que el consumo de energía en modo de espera es una parte muy importante del consumo total del sistema de ascensor, el cual puede alcanzar hasta el 80 % en forma anual [23].

Con el avance en los dispositivos semiconductores, se puede recuperar parte de la energía del grupo de tracción que, de otro modo, se disiparía y se *perdería*. Esto es posible gracias al frenado regenerativo, tema principal de este proyecto. En ciertas condiciones de viaje y carga, el motor actúa como generador, por ejemplo cuando el ascensor sube sin personas, o cuando baja completamente cargado. En caso de no utilizar ningún *driver* regenerativo, esa energía se disipa en forma de calor a través de la resistencia de frenado.

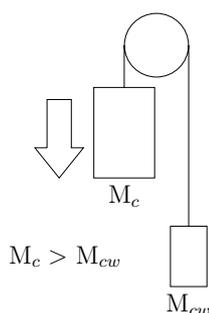


Figura 1.1: Funcionamiento del motor como generador con carga pesada.

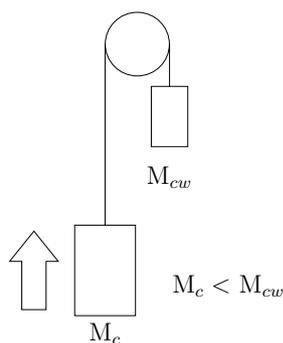


Figura 1.2: Funcionamiento del motor como generador con carga liviana.

El objetivo principal del frenado regenerativo es, o bien almacenar la energía sobrante para usos futuros, o bien devolverla a la red eléctrica. Este proyecto recorre las distintas formas de realizar lo mencionado, y estudia la viabilidad de implementarlos en Montevideo.

# Capítulo 2

## Antecedentes

El sistema de frenado regenerativo (RBS por sus siglas en inglés “*Regenerative Braking System*”) es un tipo de sistema dedicado a convertir la energía cinética en otro tipo de energía que se pueda almacenar. Al poder almacenar la energía que se produce en el frenado, mejora la eficiencia del sistema.

Existen varios métodos de conversión y almacenamiento de energía, entre los que se encuentran: baterías, supercondensadores, volantes de inercia, elásticos, sistemas electromagnéticos, e hidráulicos. El objetivo de estos dispositivos es reducir la energía disipada en forma de calor en los sistemas de frenado, almacenar parte de esta, y posteriormente hacer uso de ella para mover el vehículo. Dado que estos sistemas tienen limitaciones en cuanto a la capacidad de almacenamiento, no es posible sustituir por completo los sistemas de frenado convencionales.

Los sistemas de conversión electromagnéticos son muy usados en autos eléctricos e híbridos, así como en transportes públicos como ómnibus y trenes bala, reduciendo de manera notoria el impacto ambiental, y mejorando significativamente los costos.

El uso de frenos que absorban energía cinética y la conviertan en energía potencial para luego reutilizarla, ha existido desde finales del siglo XIX. Algunos de los primeros intentos consistían en instalar sistemas de elásticos en bicicletas y carruajes de caballos.

El ferrocarril Bakú-Tbilisi-Batumi comenzó a aplicar un sistema de frenado regenerativo a principios de la década de 1930. Este es un ejemplo del uso temprano de esta tecnología en el sistema ferroviario. El icónico metro de Londres emplea este sistema ya modernizado en algunas de sus líneas desde 2010, ahorrando hasta un 20 % de energía eléctrica consumida.

En la década de los 50, la compañía suiza Oerlikon desarrolló el Girobús, un tipo de transporte público tipo ómnibus, el cual hacía uso de un volante de inercia para almacenar energía. Sin embargo, los efectos giroscópicos del vehículo terminaron por dejarlo en desuso.

A diferencia de los primeros frenos regenerativos, el sistema KERS (por sus

## Capítulo 2. Antecedentes



Figura 2.1: Automóvil AMC Amitron. Fuente [24].

siglas en inglés “*Kinetic Energy Recovery System*”) es totalmente automático. Este nivel de automatismo llegó en la segunda mitad del siglo XX con proyectos como el AMC Amitron, un vehículo eléctrico experimental que en 1967 vio la luz sin ser comercializado. Fue Toyota el primer fabricante de automóviles en ofrecer la tecnología con RBS en sus automóviles híbridos de la serie Prius.

En los sistemas de regeneración electromagnética, el eje de transmisión de los vehículos está conectado a un generador eléctrico, que utiliza campos magnéticos para restringir la rotación del eje de transmisión, ralentizando el vehículo y generando electricidad. En el caso de los vehículos eléctricos e híbridos, la electricidad generada se envía a las baterías, recargándolas. En los vehículos de combustión interna, la electricidad puede usarse para alimentar los componentes electrónicos del automóvil o enviarse a una batería donde luego se puede usar para darle al vehículo un impulso adicional de energía.

En 2006 se comenzó a trabajar en esta tecnología de frenado y aprovechamiento de energía eléctrica aplicada al automovilismo con intenciones de implementarla en las competiciones de Fórmula 1. Su primera aparición fue en la temporada 2009.



Figura 2.2: Dispositivo KERS de F1. Fuente [14].

La popularización de los vehículos híbridos fomentó que fabricantes como Peugeot, McLaren, Toyota, Mazda, Ferrari, Renault y otros probaran sus propios sistemas KERS en diferentes modelos y competiciones más allá de la F1, aunque es en los vehículos eléctricos donde actualmente cobra más relevancia. Tesla cuenta con su propio KERS para aprovechar la energía de frenada, además de otros fabricantes como la antes mencionada Toyota, BMW, Audi, Ford, Nissan o Volvo [15].

## Capítulo 3

# Ascensores con accionamiento eléctrico

En el presente capítulo se busca introducir algunas nociones sobre el avance tecnológico que han experimentado los ascensores con accionamiento eléctrico en el último tiempo, y a su vez describir cómo son los ascensores de última generación, los cuales serán el modelo de este proyecto.

El ascensor con accionamiento eléctrico es el medio de transporte vertical más usado en el mercado, permitiendo largos recorridos a velocidades altas en un amplio rango de cargas. Además, es energéticamente eficiente, y tiene un impacto medioambiental menor a los otros ascensores [21].

Dependiendo de las necesidades de cada edificio, este tipo de ascensor puede presentar o no cuarto de máquinas. Los ascensores con cuarto de máquinas se caracterizan por tener un espacio en la parte alta del edificio destinado especialmente a la maquinaria y otros componentes del ascensor. Es en la década del 90 que surgen los ascensores sin cuarto de máquinas, y presentan un gran ahorro de espacio. En este caso, la maquinaria y los dispositivos que necesita el ascensor para su correcto funcionamiento se alojan en el hueco o en alguna planta del edificio. Esto fue posible gracias a la aparición de motores de imanes permanentes y los accionamientos de los mismos, los cuales se presentarán más adelante.

Suprimir el cuarto de máquinas fue un gran avance para la industria de ascensores, consecuencia del requerimiento cada vez más exigente de mayor espacio, lo que permite un ahorro en construcción y, muchas veces, permite agregar mayor altura al edificio. En las Figuras 3.1 y 3.2 se destacan las opciones con y sin cuarto de máquinas. Otra gran ventaja de no necesitar cuarto de máquinas, es la reducción de la disipación de calor en los componentes ubicados en dicho cuarto, evitando el agregado de ventilación adicional.

### 3.1. Componentes

El funcionamiento del ascensor se basa en un motor eléctrico que impulsa una polea envuelta en un cable, el cual sostiene en un extremo a la cabina y en el otro un contrapeso, cuyo objetivo es proporcionar un balance de energía potencial

## Capítulo 3. Ascensores con accionamiento eléctrico



Figura 3.1: Ascensor con cuarto de máquinas. Fuente [21].

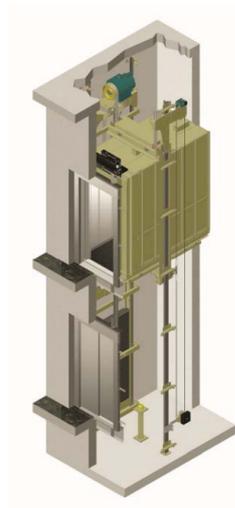


Figura 3.2: Ascensor sin cuarto de máquinas. Fuente [8].

aproximadamente constante, además de mantener tensionado el cable, de forma tal que el motor ejerza una tracción adecuada. Para esto, la masa del contrapeso se forma como la suma de la masa de la cabina y entre el 45 % y el 50 % de la carga nominal [8].

La Figura 3.3 muestra un esquema de una instalación de un ascensor junto con sus partes. Algunos elementos no aparecen en los ascensores más modernos, pero se incluyen debido a la gran cantidad de ascensores que aún no se modernizaron.

En la presente sección se realiza una breve descripción de algunos de los elementos de la instalación, enfatizando en las ventajas de tener un ascensor de última generación.

### 3.1.1. Sistema de suspensión

En los últimos años ha aumentado de manera significativa el uso de bandas de cables de acero recubiertas de poliuretano (ver Figura 3.4), famosas por su gran flexibilidad. Estas cintas logran reducir el diámetro efectivo de la polea, lo que permite utilizar motores con menor potencia dado el menor requerimiento de par.

Las cintas tienen un alto nivel de seguridad; cuentan con un sistema de control continuo del estado de las cintas, basado en un dispositivo que mide la continuidad eléctrica a través de los hilos de acero, alertando de forma instantánea si existe la posibilidad de hilos rotos o defectuosos.

### 3.1. Componentes

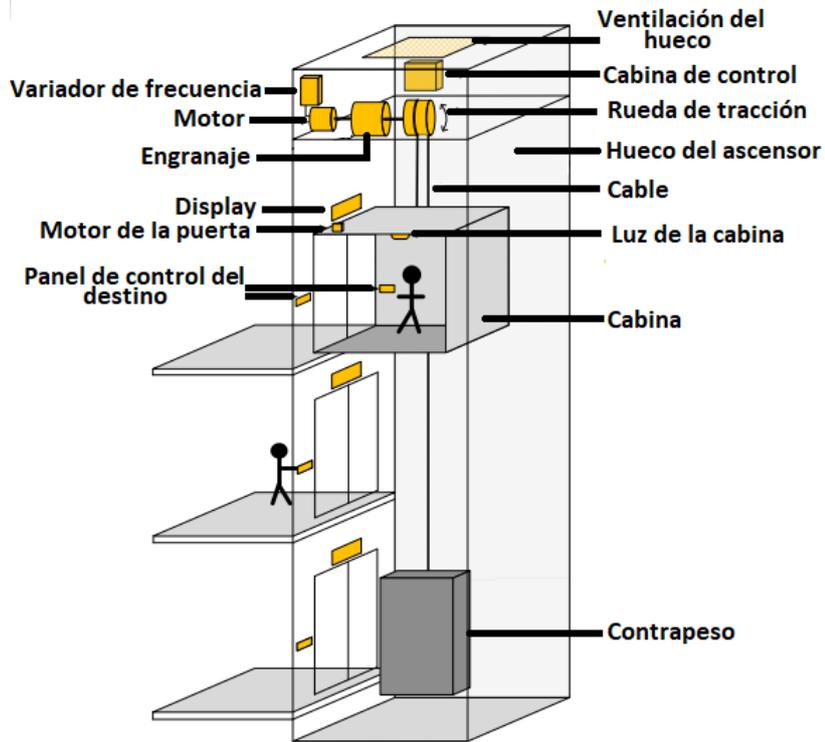


Figura 3.3: Esquema de una instalación de un ascensor. Fuente [8].

El uso de cintas de acero recubiertas con poliuretano termoplástico permite aumentar la vida útil del sistema hasta tres veces más que sistemas de tracción tradicionales, pues reducen las fricciones. Con un radio de curvatura hasta ocho veces menor que los cables de acero, estas bandas permiten trabajar con poleas de diámetro de aproximadamente 80 mm.



Figura 3.4: Cinta plana de acero recubierta de poliuretano. Fuente [21].

El recubrimiento con poliuretano vuelve innecesaria la lubricación, además de garantizar un funcionamiento más silencioso y con menos vibraciones, aportando así a la comodidad del usuario.

En cuanto a su peso, estas son hasta un 40% más livianas que los cables de acero, contribuyendo a una mejora energética [21]. Gran parte de los ascensores en

### Capítulo 3. Ascensores con accionamiento eléctrico

Montevideo no han sido modernizados, y siguen utilizando cables de acero. Estos están formados por un conjunto de alambres adecuadamente sometidos a varias operaciones para obtener el cable deseado. Generalmente su diámetro varía entre 20 mm y 150 mm, con alma de fibra o de acero, dependiendo de las características y necesidades de las instalaciones. Los mismos se caracterizan por tener una gran flexibilidad y resistencia [19].



Figura 3.5: Cable de acero galvanizado. Fuente [7].

#### 3.1.2. Engranajes

En sus principios se utilizaban engranajes para disminuir la velocidad del eje y producir el torque suficiente para llevar a cabo el movimiento de la cabina. Éstos permitían el uso de motores más pequeños y por lo tanto más económicos. Sin embargo, este sistema presenta una gran desventaja ya que disipa energía en forma de calor por la fricción entre sus partes, atentando contra la eficiencia energética del sistema.

En la Figura 3.6 se muestra un engranaje de tipo helicoidal, y en la Figura 3.7 un tornillo sin fin y corona, dos de los mecanismos más utilizados. En los ascensores de última generación no es necesario disponer de engranajes ya que la polea es impulsada directamente por el motor, sin ningún intermediario, eliminando pérdidas de fricción, reduciendo ruidos y vibraciones, impactando positivamente en la eficiencia del sistema.



Figura 3.6: Engranajes helicoidales. Fuente [8].



Figura 3.7: Tornillo sin fin y corona. Fuente [8].

### 3.1.3. Motor

Previo al avance de la electrónica de potencia, la industria de ascensores utilizaba motores de corriente continua, esto debido a su simple manejo y su bajo costo. Sin embargo, estos motores requieren de mucho mantenimiento por el desgaste de las escobillas. En la búsqueda de mejoras tecnológicas y tecnologías que requieran menos mantenimiento, el mercado puso en vigencia los motores AC de inducción.

Hoy en día, con la necesidad de optimizar el espacio y mejorar la eficiencia energética, los ascensores de última generación cuentan con un motor síncrono de imanes permanentes **PMSM** (por sus siglas en inglés “*Permanent Magnet Synchronous Motor*”), el cual no presenta engranajes. Esto último conlleva a que la velocidad del eje del motor sea igual a la velocidad de la polea encargada de mover la cabina

En la Figura 3.8 se aprecia un motor de un ascensor de última generación. El lector podrá corroborar la ausencia de engranajes.



Figura 3.8: Motor síncrono de imanes permanentes. Fuente [26].

Los **PMSM** se caracterizan por su alta potencia específica, alto torque específico, baja inercia y pérdidas relativamente bajas [32]. Además, no presentan bobinado rotórico, siendo los imanes los encargados de proporcionar el campo magnético. Una primer consecuencia de esto es que no se generan pérdidas por efecto Joule en el rotor, a diferencia de las máquinas que tienen su rotor bobinado como por ejemplo la máquina de inducción. La rotación a velocidad de sincronismo entre el rotor y el campo estatórico hace que no se generen pérdidas en el hierro del circuito magnético del rotor.

Como el PMSM no presenta pérdidas en el rotor, no se genera calor, por lo que se facilita el enfriamiento, pudiendo alcanzar mayores densidades de corriente en el bobinado del estator y una mayor inducción magnética, es decir, se tiene una mayor potencia específica. Una máquina de inducción de la misma potencia nominal tiene de 20 % a 30 % más de masa y volumen que una máquina síncrona de imanes permanentes [32]. Esto es una gran ventaja, ya que al disminuir el tamaño de la máquina se pudo suprimir el cuarto de máquinas.

El motor debe controlar el movimiento de la cabina, con una trayectoria prees-

### Capítulo 3. Ascensores con accionamiento eléctrico

tablecida, otorgando el torque necesario. Para eso la velocidad del rotor debe experimentar un continuo cambio. La Ecuación 3.1 muestra la relación a la cual responde la velocidad del rotor, donde  $\Omega_m$  es la velocidad de rotación del motor,  $\omega_e$  es la frecuencia angular de la fuente de alimentación de la máquina y  $p$  la cantidad de pares de polos de la misma.

$$\Omega_m = \frac{\omega_e}{p} \quad (3.1)$$

Por esta razón, el PMSM para el control de movimiento nunca se alimenta directamente de la red, ya que se debe variar constantemente la frecuencia y el voltaje de alimentación; estas máquinas, para dicha aplicación, se alimentan a través de un variador de frecuencia.

#### 3.1.4. Variador de frecuencia

El variador de frecuencia (VFD por sus siglas en inglés “*Variable Frequency Drive*”), es el que permite el control de la velocidad de rotación del motor del ascensor. Este dispositivo es alimentado a través de la red eléctrica (con voltaje y frecuencia constante) y es capaz de variar la frecuencia y la amplitud del voltaje dependiendo de las necesidades del motor. De esta forma es posible tener cualquier velocidad del rotor, dentro de los parámetros permitidos por la máquina.

Para lograr su objetivo, el VFD primero transforma la energía alterna a continua, a través de un puente rectificador trifásico de diodos. A la salida del puente, se coloca un condensador de forma tal de poder disminuir el *ripple* de la tensión (minimizar la componente alterna) y obtener así una tensión lo más parecido a una constante en el bus de continua.

A la salida se coloca un inversor para transformar la energía continua en alterna. Este inversor usualmente está compuesto por 6 transistores IGBTs, que accionándolos de forma adecuada, pueden sintetizar una onda de tensión con la amplitud y la frecuencia que necesita el motor. En la Figura 3.9 se exhibe el sistema descrito.

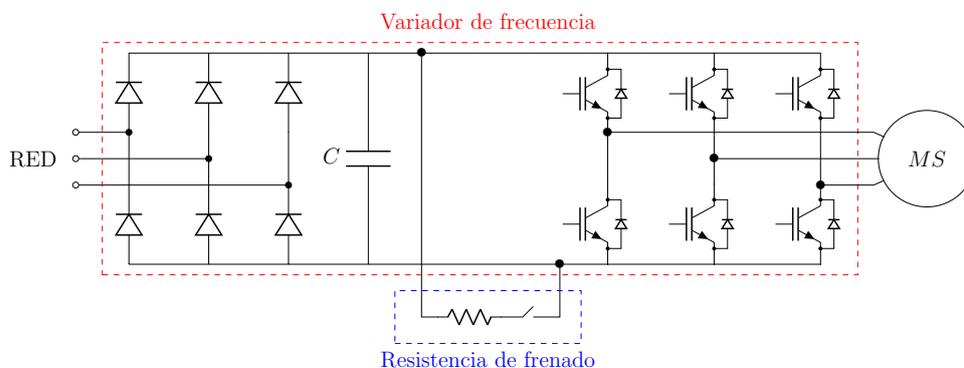


Figura 3.9: Esquema de conexión del motor con variador de frecuencia.

### 3.1. Componentes

Como se mencionó en las secciones anteriores, en ciertos momentos el motor funciona como generador, elevando el voltaje del bus de continua. Dicha tensión puede afectar la vida útil de los otros componentes del sistema.

Para que el variador funcionase de forma correcta, en el bus de continua se solía incluir una resistencia de frenado. La resistencia de frenado tenía el rol de disipar el excedente de energía en forma de calor, limitando la tensión a valores que no fueran peligrosos. En la actualidad existen dispositivos que almacenan esa energía o la devuelven a la red utilizando el frenado regenerativo.

#### 3.1.5. Reductor de poleas

Los sistemas de reducción de poleas tienen como función adecuar las capacidades de los motores a las necesidades de los ascensores. Los ascensores suelen moverse más lento en comparación con las velocidades de rotación de los motores, a la vez que las cargas de los ascensores suelen resultar en torques elevados.

Según las necesidades, se pueden realizar varias configuraciones, permitiendo una amplia gama de reducciones en los torques, pero con la contrapartida de tener que hacer operar al motor a mayor velocidad.

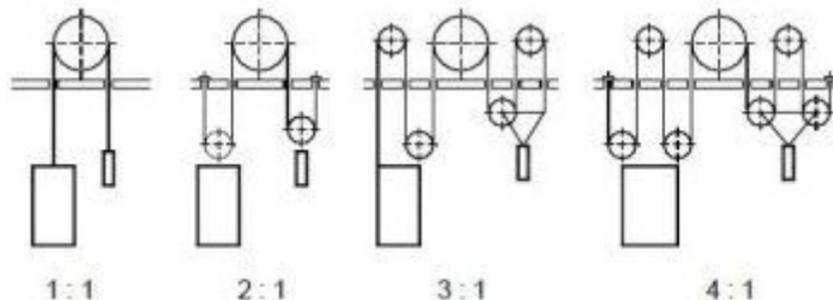


Figura 3.10: Sistemas de reducción de torque en ascensores. Fuente [18].

Para entender mejor su funcionamiento, se supone que el cable es inextensible y sin masa. A partir del principio de *acción-reacción*, se puede afirmar que a velocidad constante (sistema inercial), la tensión a la que se ve sometida la cabina (bloque de mayor tamaño), es en módulo igual a su peso. Se puede razonar del mismo modo con el contrapeso (bloque de menor tamaño). Por lo tanto, en la configuración **1:1**, el motor se ve sometido a un torque de valor proporcional a la diferencia de tensiones.

Se puede ver que cualquier desplazamiento de la cabina repercute en un mismo desplazamiento angular sobre la polea del motor.

En el caso de la configuración **2:1**, la diferencia radica en que el cable ejerce una tensión sobre la cabina, pero en dos puntos a través de una polea. Por lo tanto, el valor de la tensión debe de ser la mitad del peso de la cabina. Con el

## Capítulo 3. Ascensores con accionamiento eléctrico

contrapeso se produce el mismo efecto, por lo tanto el motor se ve sometido a un torque proporcional a la mitad de la diferencia de masas.

Para poder desplazar la cabina una determinada distancia, se necesita desplazar el doble de largo de cable, con lo cual el motor deberá desplazar su rotor el doble del ángulo barrido en la configuración **1:1**.

Para las siguientes configuraciones, el razonamiento es análogo. Cabe destacar que siempre debe verificarse que la proporción de reducción en torque se refleja en un aumento de la velocidad con el mismo factor.

### 3.2. Clasificación

A la hora de llegar a una solución a la problemática planteada, será importante dirimir cuál es la solución óptima en cada caso. Para eso se debe realizar una clasificación de ascensores, según la velocidad, el recorrido, la carga y la frecuencia de uso. En la Tabla 3.1 se muestra la clasificación según la velocidad, el recorrido y la carga del ascensor.

Clasificación	Bajo	Medio	Alto
Velocidad [m/s]	0.15 - 0.6	1 - 2.5	3 o más
Distancia [m]	3 - 15	20 - 80	90 o más
Carga [kg]	180 - 450 (2 a 6 personas)	252 - 1250 (7 a 16 personas)	1275 o más (17 personas o más)

Tabla 3.1: Clasificación del tipo de ascensor según su velocidad, recorrido y carga. Fuente [21].

Se dice que un ascensor es de tráfico *reducido*, si hay poca densidad de población en el edificio, y el número de plantas del mismo no es superior a 5, por ejemplo en edificios residenciales, escuelas, pequeñas oficinas, etc. Para los edificios de 6 plantas en adelante, ya se consideran de tráfico medio-alto. Ejemplo son los hospitales, aeropuertos, hoteles, entre otros.

# Capítulo 4

## Modelo mecánico y dinámica del ascensor

Para poder entender el funcionamiento del ascensor, es menester estudiar su dinámica en conjunto con su modelo mecánico. En esta parte del texto se estudian estos conceptos, se presenta la expresión del torque necesario que debe ejercer el motor para realizar el movimiento, y todas las ecuaciones que rigen el movimiento de la cabina, describiendo detalladamente su construcción.

### 4.1. Modelo mecánico

Se presentan dos modelos mecánicos del ascensor, con distintos órdenes de complejidad, respondiendo a distintas no idealidades que se observarán a lo largo del texto.

Se recomienda el seguimiento de ambos modelos para que el entendimiento sea progresivo, aunque si lo desea, puede dirigirse directamente al modelo más detallado del ascensor en la Sección 4.1.2.

#### 4.1.1. Primera aproximación al modelo mecánico

El modelo mecánico del ascensor, en una primera instancia, se asemeja al de una polea de masa  $m_p$  y radio  $r$  que tiene dos masas suspendidas: el contrapeso de masa  $m$  y la cabina de masa  $M$ , y cuyo torque externo viene dado por el motor. Dicha descripción se puede ver en la Figura 4.1.

Aplicando la *Segunda Ley de Newton* en la cabina, se obtiene la Ecuación 4.1, donde  $T_1$  es la tensión ejercida por el cable.

$$M\ddot{y} = T_1 - Mg \Rightarrow T_1 = M\ddot{y} + Mg \quad (4.1)$$

De forma análoga para el contrapeso:

## Capítulo 4. Modelo mecánico y dinámica del ascensor

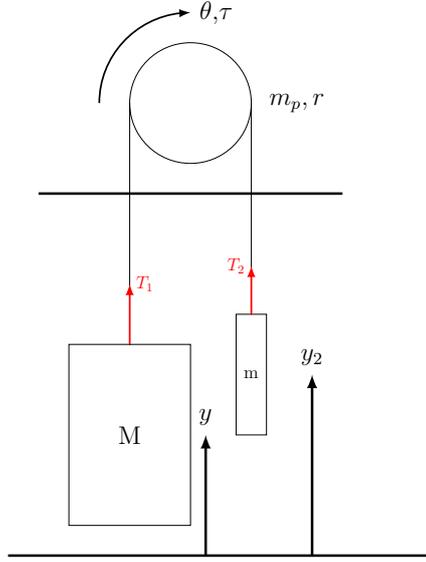


Figura 4.1: Modelo mecánico del ascensor.

$$m\ddot{y}_2 = T_2 - mg \Rightarrow T_2 = m\ddot{y}_2 + mg \quad (4.2)$$

con  $T_2$  fuerza tensión ejercida sobre el contrapeso por el cable.

Una primera aproximación es considerar el cable como inextensible. De esta manera, lo que recorre verticalmente la cabina también lo recorrerá en sentido opuesto el contrapeso. Como consecuencia, la ecuación de vínculo entre las aceleraciones de la cabina y del contrapeso es la siguiente:

$$\Delta y = -\Delta y_2 \rightarrow \dot{y} = -\dot{y}_2 \rightarrow \ddot{y} = -\ddot{y}_2 \quad (4.3)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se deduce que:

$$\begin{cases} T_1 = M\ddot{y} + Mg \\ T_2 = mg - m\ddot{y} \end{cases}$$

Aplicando la *Segunda Cardinal* en el centro de la polea, e imponiendo que el cable tiene masa despreciable, se obtiene la siguiente expresión:

$$J\ddot{\theta} = \tau + (T_2 - T_1)r \quad (4.4)$$

donde  $J$  es la inercia de la polea y  $\tau$  el torque ejercido por el motor eléctrico.

Agrupando las ecuaciones vistas, se puede ver que el torque  $\tau$  sigue la siguiente ecuación:

$$\tau = J\ddot{\theta} + (M + m)\ddot{y}r + (M - m)gr$$

#### 4.1. Modelo mecánico

La Ecuación 4.5 es otra consecuencia de considerar al cable inextensible. Luego, el par eléctrico queda determinado como en la Ecuación 4.6.

$$y = r.\theta \quad (4.5)$$

$$\tau = [J + (M + m)r^2]\ddot{\theta} + (M - m)gr \quad (4.6)$$

Asumiendo la polea como un disco de masa  $m_p$  y radio  $r$ , la inercia respecto a un eje perpendicular al plano del disco y que pasa por su centro viene dada por la siguiente igualdad:

$$J = \frac{m_p r^2}{2} \quad (4.7)$$

Es habitual realizar la siguiente aproximación:  $\frac{m_p}{2} \ll M + m$ ; esto es debido a que la masa de la polea es pequeña en comparación con la masa del contrapeso y la cabina. La Ecuación 4.8 es la forma más reducida y simplificada que tiene el torque de origen eléctrico.

$$\tau \simeq (M + m)r^2\ddot{\theta} + (M - m)gr \quad (4.8)$$

Cuando el ascensor se mueve a velocidad constante, el torque eléctrico que se ejerce depende proporcionalmente de la diferencia de las masas del contrapeso y la cabina, y el torque bajo estas condiciones es constante.

La Figura 4.2 representa mediante un diagrama de bloques la ecuación diferencial 4.6, y los parámetros involucrados se expresan en la Tabla 4.1. En relación a los parámetros definidos como  $A_\tau$  y  $B_\tau$ , la entrada se expresa en función de la salida como en la Ecuación 4.9.

$$\tau[z] = A_\tau \cdot \frac{z-1}{z} \dot{\theta}[z] + B_\tau \quad (4.9)$$

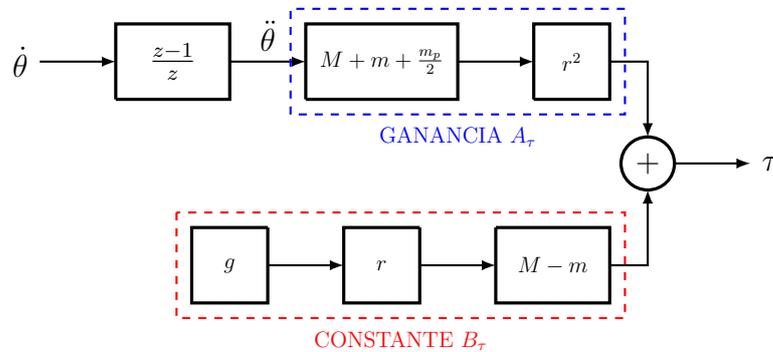


Figura 4.2: Diagrama de bloques del primer modelo mecánico.

## Capítulo 4. Modelo mecánico y dinámica del ascensor

Parámetro	Comentario
$m_p$	Masa de la polea
$M$	Masa de la cabina (con carga)
$m$	Masa del contrapeso
$r$	Radio de la polea
$g$	Aceleración gravitatoria

Tabla 4.1: Parámetros del primer modelo del ascensor.

Esta primera aproximación del modelo del ascensor muestra que, a velocidad constante, el torque eléctrico ejercido por el motor también es constante. Esto no se refleja en la realidad como se verá más adelante, y es por ello que se debe ir un paso más. En la siguiente sección se estudiará el modelo del ascensor desprendiéndonos de ciertas hipótesis.

### 4.1.2. Segunda aproximación al modelo mecánico

Para poder modelar de forma más adecuada los efectos vistos en las mediciones que se expondrán en capítulos posteriores, se recurre a una versión más compleja del modelo del sistema.

En este caso se considera que tanto la cabina como el contrapeso están formados por sus propias masas, las de sus poleas y las de los segmentos de cable que rodean a las poleas. Para modelar la masa del cable se recurre a la densidad de masa por unidad de longitud  $\lambda$ .

En la Figura 4.3 se muestra el sistema mecánico en el cual se basan los cálculos realizados a lo largo de la sección.

Se definen las variables  $M$  y  $M_c$  de la siguiente manera:

$$M = \bar{M} + m_1 + \lambda\pi r_1 \quad (4.10)$$

$$M_c = \bar{M}_c + m_2 + \lambda\pi r_2 \quad (4.11)$$

La Tabla 4.2 resume los parámetros expuestos en las ecuaciones anteriores. Al motor se lo modelará como una polea de masa  $m_p$  y radio  $r$ .

Por simplicidad de cálculos, se considerarán las posiciones de la cabina y el contrapeso  $y$  e  $y_2$  medidas desde el suelo y positivas hacia arriba. La distancia máxima que se podrá recorrer será representada por  $L$ .

La posición angular  $\theta$  tendrá sentido positivo en la medida que contribuya al aumento de  $y$ . El torque  $\tau$  ejercido por el motor seguirá la misma convención de signos.

#### 4.1. Modelo mecánico

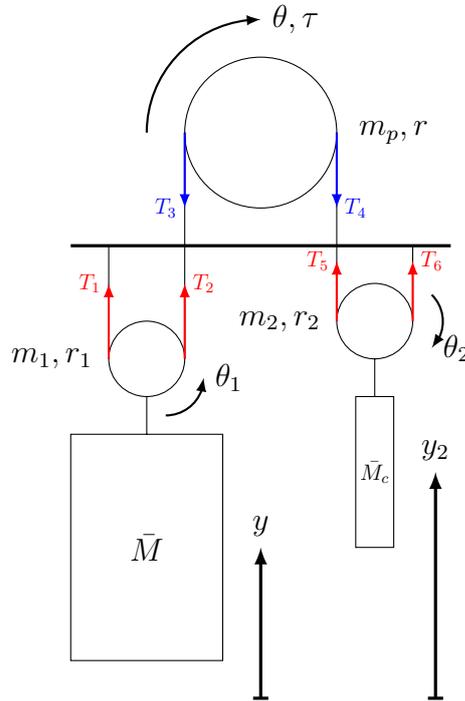


Figura 4.3: Modelo mecánico del ascensor con sistema de poleas 2:1.

Parámetro	Comentario
$\bar{M}$	Masa de la cabina
$m_1$	Masa de la polea de la cabina
$r_1$	Radio de la polea de la cabina
$\bar{M}_c$	Masa del contrapeso
$m_2$	Masa de la polea del contrapeso
$r_2$	Radio de la polea del contrapeso

Tabla 4.2: Parámetros del segundo modelo del Ascensor.

Planteando el diagrama del cuerpo libre del conjunto de la cabina, se obtienen la primer cardinal en la Ecuación 4.12 y la segunda cardinal en la Ecuación 4.13, donde  $T_1$  y  $T_2$  son las tensiones de ambos trozos de cuerda en la polea de la cabina. Notar que la cabina realiza fuerza sobre la polea, pero con un brazo de palanca nulo, por lo tanto no genera ningún aporte en la segunda cardinal.

$$(T_1 + T_2) - gM = \ddot{y}M \quad (4.12)$$

## Capítulo 4. Modelo mecánico y dinámica del ascensor

$$(T_2 - T_1) \cdot r_1 = \left( \frac{m_1 \cdot r_1^2}{2} + (\lambda \pi r_1) \cdot r_1^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_1 \quad (4.13)$$

La ecuación de vínculo entre  $\theta_1$  e  $y$  viene dada por la siguiente expresión:

$$r_1 \cdot \theta_1 = y$$

Realizando el diagrama del cuerpo libre del segmento de cable que une la polea de la cabina con la polea del motor, se obtiene la Ecuación 4.14.

$$T_3 - T_2 - [\lambda(L - y)] \cdot g = \frac{dp_1}{dt} \quad (4.14)$$

Donde  $p_1$  representa el momento lineal del cable, que se expresa como el producto de su masa por su velocidad.

Teniendo en cuenta que se puede considerar al cable como un continuo con una densidad de masa por unidad de longitud, se puede llegar a una expresión para la masa del tramo de cable para cada instante de tiempo, a partir de la distancia  $L - y$ , que no es más que la longitud del segmento de cable.

Para obtener la velocidad del segmento, se debe considerar que el juego de poleas genera una relación 2:1 entre la velocidad de rotación del motor y la velocidad de la cabina, por lo que si la cabina asciende  $\Delta y$ , el cable se habrá desplazado  $2\Delta y$ . Es entonces que:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{d}{dt} [\lambda(L - y) \cdot (2\dot{y})] \quad (4.15)$$

Desarrollando la derivada de la Ecuación 4.15 y simplificando en 4.14 se obtiene la siguiente expresión:

$$T_3 - T_2 - g\lambda L + g\lambda y = -2\lambda\dot{y}^2 + 2\lambda\ddot{y}(L - y) \quad (4.16)$$

Del diagrama de cuerpo libre sobre la polea del motor:

$$\tau + (T_4 - T_3) \cdot r_p = \left( \frac{m \cdot r_p^2}{2} + (\lambda \pi r_p) \cdot r_p^2 \right) \cdot \ddot{\theta} \quad (4.17)$$

$$r_p \cdot \dot{\theta} = 2\dot{y}$$

Realizando el diagrama del cuerpo libre del segmento de cable que conecta la polea del contrapeso y la polea del motor, en función de  $y_2$ , se deduce:

$$T_4 - T_5 - [\lambda(L - y_2)] \cdot g = \frac{dp_2}{dt} \quad (4.18)$$

Se aplica la ecuación de la derivada del momento  $p_2$ , dado que tanto la masa como la velocidad del segmento están cambiando en función del tiempo. El resultado de la misma es el que se muestra en la Ecuación 4.19:

#### 4.1. Modelo mecánico

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{d}{dt} [\lambda(L - y_2) \cdot (2\dot{y}_2)] \quad (4.19)$$

Al igual que en el caso de la cabina, al sustituir y simplificar se obtiene:

$$T_4 - T_5 - g\lambda L + g\lambda y_2 = -2\lambda\dot{y}_2^2 + 2\lambda\ddot{y}_2(L - y_2) \quad (4.20)$$

Para el diagrama del cuerpo libre del contrapeso se obtienen ambas cardinales con su correspondiente ecuación de vínculo entre  $\theta_2$  e  $y_2$ .

$$(T_5 + T_6) - gM_c = \ddot{y}_2 M_c \quad (4.21)$$

$$(T_5 - T_6) \cdot r_2 = \left( \frac{m_2 \cdot r_2^2}{2} + (\lambda\pi r_2) \cdot r_2^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_2 \quad (4.22)$$

$$r_2 \cdot \theta_2 = y_2$$

Una vez realizados los diagramas de cuerpo libre, solo resta ver las ecuaciones que vinculan los segmentos de cable restantes con sus fijaciones al techo. Sin embargo, dado que no se puede determinar una expresión para las fuerzas que se ejercen en los vínculos, se considera que las tensiones a ambos lados de las poleas de la cabina y el contrapeso son aproximadamente iguales:

$$T_1 \simeq T_2$$

$$T_5 \simeq T_6$$

Dicha aproximación tiene su justificativo al considerar que las masas de las poleas y los segmentos de cable que las rodean, conforman un momento de inercia despreciable. Esto permite despejar las tensiones  $T_1$  y  $T_6$  de las ecuaciones de la cabina y el contrapeso.

$$\left( \frac{m_1 \cdot r_1^2}{2} + (\lambda\pi r_1) \cdot r_1^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_1 \simeq 0$$

$$\left( \frac{m_2 \cdot r_2^2}{2} + (\lambda\pi r_2) \cdot r_2^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_2 \simeq 0$$

Para finalizar el análisis, resta encontrar la relación entre  $y$  e  $y_2$ . Observando que el cable se considera inextensible, y que cuando la cabina está en el piso más bajo, el contrapeso está a la máxima altura y viceversa, es que resulta:

$$y + y_2 = cte \Rightarrow \dot{y} + \dot{y}_2 = 0 \Rightarrow \ddot{y} + \ddot{y}_2 = 0$$

Realizando las sustituciones correspondientes, y simplificando las ecuaciones, se logra la ecuación de movimiento en función de la variable angular  $\theta$  que se presenta a continuación:

## Capítulo 4. Modelo mecánico y dinámica del ascensor

$$\tau = \left( \frac{M + M_c + m}{2} + \lambda(\pi r + 4L - 2k) \right) \frac{r^2}{2} \ddot{\theta} - (g\lambda)r^2\theta + g \left( \frac{M - M_c}{2} + \lambda k \right) r \quad (4.23)$$

Se aclara que  $k$  y  $L$  son constantes que valen lo mismo a menos de los radios de las poleas y los recorridos de los cables entre las poleas de la cabina y del contrapeso, siendo  $L$  la distancia máxima que puede recorrer el ascensor.

El lector podrá apreciar que, la diferencia más sustancial de la ecuación presentada con la Ecuación 4.6 del modelo simplificado, es la presencia de la variación del torque  $\tau$  con la variable angular  $\theta$ .

La Figura 4.4 representa el diagrama de bloques de la Ecuación 4.24. Por simplicidad, se sustituyen los términos de la Ecuación 4.23 por los siguientes:

$$A_\tau = \frac{1}{2} \left( \frac{M + M_c + m}{2} + \lambda(\pi r + 4L - 2k) \right)$$

$$B_\tau = \frac{g}{r} \left( \frac{M - M_c}{2} + \lambda k \right)$$

$$\tau[z] = \left( A_\tau \cdot \frac{z-1}{z} \cdot \frac{z-1}{z} \dot{\theta}[z] - g\lambda\theta[z] + B_\tau \right) \cdot r^2 \quad (4.24)$$

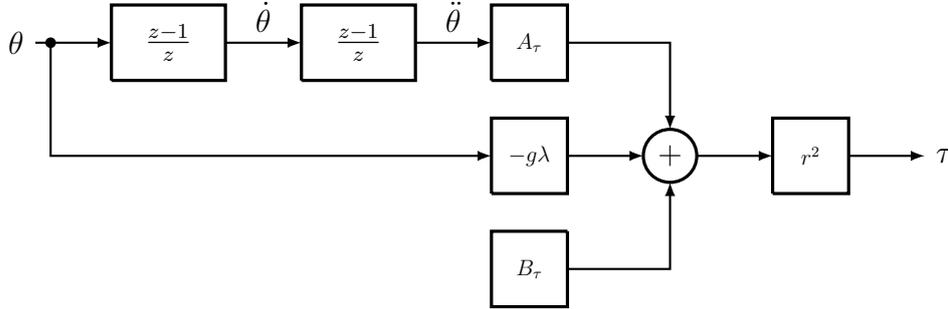


Figura 4.4: Diagrama de Bloques del segundo modelo mecánico.

## 4.2. Dinámica del ascensor

En esta sección se estudia el movimiento de la cabina del ascensor frente a un determinado escenario de carga.

Supongamos que el ascensor parte del reposo desde un piso genérico  $i$ , a una altura  $h_i$  medida desde planta baja. El ascensor subirá al piso  $j$  ubicado a una distancia  $h_j$  desde planta baja. Asumamos además, sin pérdida de generalidad, que el ascensor parte del reposo.

En la Figura 4.5 se muestra la curva de velocidad que impone el variador de frecuencia, explicitando los parámetros que se pueden variar.

## 4.2. Dinámica del ascensor

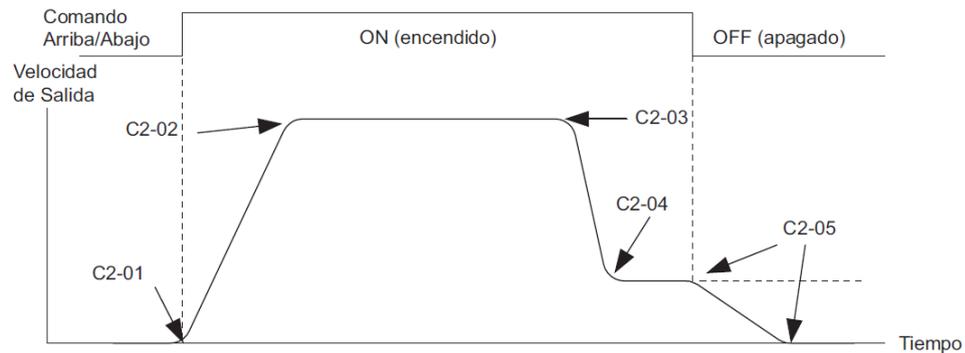


Figura 4.5: Curva de velocidad que otorga el variador de frecuencia. Fuente [35].

Parámetro	Comentario
C2-01	Salto al inicio de la aceleración
C2-02	Salto al final de la desaceleración
C2-03	Salto al inicio de la desaceleración
C2-04	Salto al final de la desaceleración
C2-05	Salto por debajo de la velocidad de nivelación

Tabla 4.3: Parámetros de la curva de velocidad que el variador de frecuencia permite modificar. Fuente [35].

Denominemos  $a_a$  al valor de la aceleración de la cabina,  $-a_d$  al valor de la desaceleración cuando frena, y  $V$  al valor de la velocidad de la cabina en régimen. También consideremos los parámetros  $V_{niv}$  y  $-a_{niv}$ , que son la velocidad de nivelación y la desaceleración de nivelación, correspondientes al tramo final.

Se pueden identificar cinco movimientos distintos que realizará la cabina: un movimiento con aceleración positiva, uno a velocidad constante, otro con aceleración negativa (freno), uno de nivelación y uno de frenado, como se detalla en la Figura 4.6.

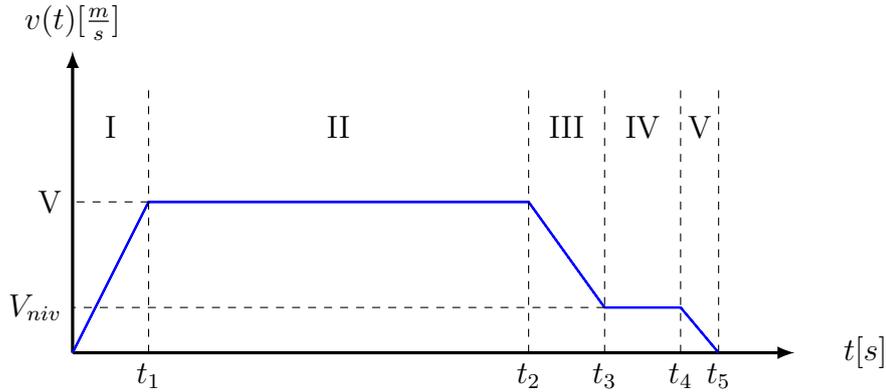


Figura 4.6: Curva simplificada de velocidad del Ascensor.

### I) Primer Tramo

En el intervalo  $[0; t_1]$ , la cabina parte del reposo y tiene un movimiento con aceleración constante igual a  $a_a$ . Las Ecuaciones 4.25 y 4.26 representan la velocidad y posición de la cabina respectivamente.

$$v(t) = a_a \cdot t \quad (4.25)$$

$$h(t) = \frac{a_a}{2} \cdot t^2 + h_i \quad (4.26)$$

Transcurrido un tiempo  $t_1$ , la cabina comienza a tener una velocidad constante de valor  $V$ . Ese tiempo queda completamente determinado conocidos los valores de aceleración y velocidad en régimen como en la Ecuación 4.27. Luego, el ascensor habrá ascendido a la posición  $h_1$  dada por la Ecuación 4.28.

$$t_1 = \frac{V}{a_a} \quad (4.27)$$

$$h_1 = \frac{V^2}{2a_a} + h_i \quad (4.28)$$

### II) Segundo tramo

En el segundo tramo el ascensor viaja a velocidad constante  $V$ . Las ecuaciones que reflejan la velocidad de la cabina y la posición desde planta baja son las siguientes:

$$v(t) = V \quad (4.29)$$

$$h(t) = V \cdot (t - t_1) + h_1 \quad (4.30)$$

Por lo tanto, para determinar la distancia recorrida en este tramo, basta despejar la duración del tramo a partir de la duración total del viaje.

$$h_2 - h_1 = V \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.31)$$

**III) Tercer tramo**

El tercer tramo indica el frenado del ascensor. Aquí, la aceleración  $-a_d$  es negativa.

$$v(t) = -a_d \cdot (t - t_2) + V \quad (4.32)$$

$$h(t) = -\frac{a_d}{2} \cdot (t - t_2)^2 + V \cdot (t - t_2) + h_2 \quad (4.33)$$

Un tiempo  $t_3$  después, el ascensor se frena alcanzando la velocidad de nivelación  $V_{niv}$ . Este tiempo queda determinado conociendo la aceleración  $a_d$  y las velocidades  $V$  y  $V_{niv}$ . Luego, la altura de la cabina respecto a planta baja es la de la Ecuación 4.35.

$$t_3 - t_2 = \frac{V - V_{niv}}{a_d} \quad (4.34)$$

$$h_3 = -\frac{(V - V_{niv})^2}{2a_d} + \frac{V(V - V_{niv})}{a_d} + h_2 \quad (4.35)$$

**IV) Cuarto tramo**

Aquí, la cabina se desplaza a velocidad constante  $V_{niv}$ , con el objetivo de nivelarse de manera suave en el piso deseado. Las ecuaciones de movimiento resultan:

$$v(t) = V_{niv} \quad (4.36)$$

$$h(t) = V_{niv} \cdot (t - t_3) + h_3 \quad (4.37)$$

El intervalo de tiempo que dura este movimiento es conocido y está definido, por lo tanto:

$$t_4 - t_3 = T_{niv} \quad (4.38)$$

Entonces la distancia recorrida es:

$$h_4 = V_{niv} \cdot T_{niv} + h_3 \quad (4.39)$$

**V) Quinto tramo**

En este último tramo, la cabina se frena por completo para finalizar el viaje.

$$v(t) = -a_{niv}(t - t_4) + V_{niv} \quad (4.40)$$

$$h(t) = -\frac{a_{niv}(t - t_4)^2}{2} + V_{niv}(t - t_4) + h_4 \quad (4.41)$$

## Capítulo 4. Modelo mecánico y dinámica del ascensor

Si se impone que en  $t_5$  la velocidad sea nula, se obtienen los siguientes resultados:

$$t_5 - t_4 = \frac{V_{niv}}{a_{niv}} \quad (4.42)$$

$$h_5 = \frac{V_{niv}^2}{2a_{niv}} + h_4 \quad (4.43)$$

Los parámetros de aceleración y velocidad son siempre conocidos, y dependientes de las especificaciones del ascensor. Es así que, sin pérdida de generalidad, dado dos pisos cualesquiera en un edificio, conociendo el tiempo que demora el viaje se puede determinar la distancia entre dichos pisos (o viceversa). Esto se muestra en la Ecuación 4.47.

$$t_5 = (t_5 - t_4) + (t_4 - t_3) + (t_3 - t_2) - (t_2 - t_1) + t_1 = T \quad (4.44)$$

$$T = \frac{V_{niv}}{a_{niv}} + T_{niv} + \frac{V - V_{niv}}{a_d} + (t_2 - t_1) + \frac{V}{a_a} \quad (4.45)$$

$$(h_2 - h_1) = V \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.46)$$

$$h_j - h_i = \frac{V_{niv}^2}{2a_{niv}} + V_{niv}T_{niv} + \frac{V(V - V_{niv})}{a_d} - \frac{(V - V_{niv})^2}{2a_d} + (h_2 - h_1) + \frac{V^2}{2a_a} \quad (4.47)$$

# Capítulo 5

## Métodos Regenerativos

A lo largo de este capítulo recorreremos los distintos métodos de regeneración de energía eléctrica, destacando ventajas y desventajas de los mismos; veremos cuáles son los métodos que más se utilizan en la actualidad y se realiza un análisis energético considerando los factores económicos que demanda el mercado.

### 5.1. Supercondensadores

Si hablamos de dispositivos capaces de almacenar energía eléctrica, es imposible no pensar en los condensadores; pero debido a que en este tipo de aplicación se requiere almacenar cantidades grandes de energía, es necesario referirse expresamente a un tipo de condensadores cuya capacidad sea más grande que la de los condensadores convencionales: estos son los supercondensadores (SC). Se explicará de manera breve qué son y cómo funcionan.

Los supercondensadores son un tipo de condensadores que se destacan por su alta capacitancia del orden de los faradios, miles de veces más grande que un condensador electrolítico. Esto hace que los supercondensadores sean idóneos para almacenar energía.

En las últimas décadas el uso de supercondensadores tuvo un incremento extraordinario, impulsado por la necesidad de un elemento que almacene energía eléctrica de manera eficiente. Soluciones clásicas utilizan baterías para cumplir este propósito, pero los supercondensadores presentan una ventaja por sobre las baterías ya que estos tienen la propiedad intrínseca de no perder la energía almacenada en ellos, además de tener un menor desgaste en el tiempo.

Otras ventajas que presentan estos dispositivos electrónicos frente a otros elementos de almacenamiento de energía eléctrica, son la posibilidad de controlar un mayor flujo de potencia debido a la baja resistencia interna (ESR) que poseen, y su capacidad de realizar más ciclos de carga y descarga en un rango mayor de temperatura.

Varios modelos existen para representar el comportamiento de los supercondensadores. El más simple consiste en un condensador en serie con una resistencia,

## Capítulo 5. Métodos Regenerativos

representando la ESR <sup>1</sup>del condensador (ver Figura 5.1). La capacidad del supercondensador depende del estado de carga, que a su vez depende de su voltaje en bornes. Esta variación es lineal, y su modelo consiste en una parte constante, y otra dependiente del voltaje como muestra la Ecuación 5.1, donde  $C_0$  es constante, y  $C_1$  usualmente adopta valores entre 10% y 20% de  $C_0$ .

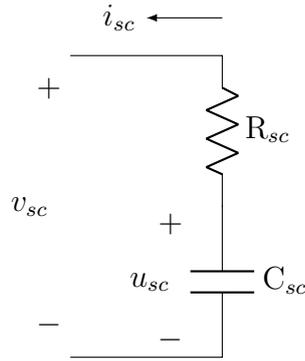


Figura 5.1: Modelo de los SC.

$$C(u_{sc}) = C_0 + C_1 \cdot u_{sc} \quad (5.1)$$

Los supercondensadores son también conocidos como condensadores de capa doble; consisten en dos electrodos que están a una distancia tan pequeña uno del otro (del orden de los nanómetros), que solo pueden estar sometidos a un voltaje por debajo de los 3 V. Por lo tanto, es necesario colocar varios en serie para alcanzar un mayor voltaje, formando así un banco de supercondensadores a utilizar en aplicaciones donde potencias grandes son requeridas.

La Figura 5.2 muestra el circuito RC equivalente de varios supercondensadores conectados en serie. La resistencia  $R_{esr}$  es la resistencia serie equivalente y la cual toma valores muy pequeños, mientras que la resistencia  $R_p$  modelada en paralelo, representa la resistencia de pérdidas, la cual puede ser despreciada por su alto valor, que para un supercondensador de 500 F, establece una corriente de pérdidas de 10 mA, valor cientos de veces menor que la corriente nominal. [20]

El voltaje en los supercondensadores se mantiene entre sus valores  $V_{max}$  y  $V_{min}$ , máximo y mínimo respectivamente. Por ello, no toda la energía almacenada en ellos está disponible. La cantidad de energía disponible para usar se presenta en la Ecuación 5.2

$$E_{max} = \frac{1}{2}C(V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (5.2)$$

<sup>1</sup>Equivalent series resistance

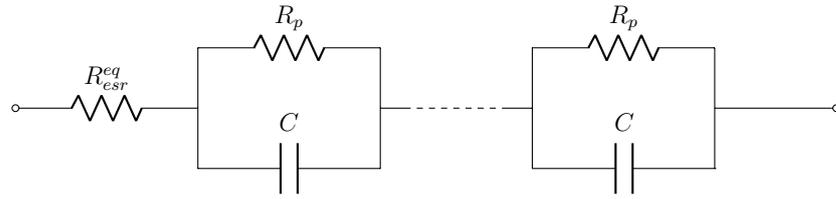


Figura 5.2: Circuito equivalente de SC en serie.

## 5.2. Regeneración con SC

El concepto de regeneración de energía eléctrica en ascensores utilizando supercondensadores, consiste en el almacenamiento de la energía “sobrante” que se genera cuando el ascensor sube con cargas livianas o vacío, o cuando el ascensor baja con cargas pesadas. Esta energía se almacena en bancos de supercondensadores de manera de poder utilizarla en usos futuros.

El sistema de la Figura 5.3 consta en esencia del ascensor, el motor, un banco de supercondensadores, un rectificador, un inversor y un convertor DC-DC. La unidad de liberación de energía contiene una resistencia de frenado, la cual se utiliza para disipar la energía sobrante una vez que el supercondensador está completamente cargado.

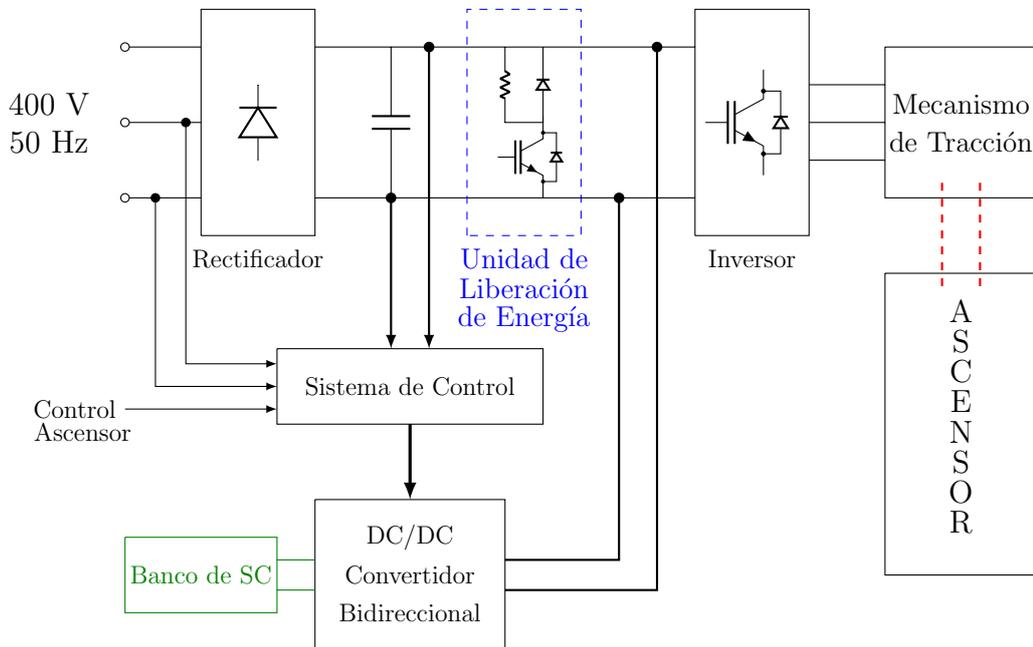


Figura 5.3: Sistema de regeneración con banco de SC.

El sistema de control determina la corriente del banco de condensadores. Por su parte, el convertor DC-DC se utiliza para interconectar el alto voltaje de continua

## Capítulo 5. Métodos Regenerativos

con el bajo voltaje del banco de supercondensadores. El mecanismo de control del ascensor controla el sistema y determina la operación del mismo.

Inicialmente, cuando el banco está completamente descargado, el mismo es cargado desde la red. Durante este período, el motor también es alimentado desde la red. Cuando el banco está cargado pero no al punto de poder dar energía solo, el motor es alimentado en conjunto por el banco de supercondensadores y la red; ya cuando el banco está completamente cargado, o si algún fenómeno intempestivo ocurre como lo es la desconexión de la red, el motor solamente se alimentará de los supercondensadores. Finalmente, cuando los supercondensadores están descargados nuevamente, se vuelven a cargar pero ahora a partir de la energía de frenado regenerativo del motor.

Una alternativa es alimentar un sistema auxiliar de emergencia utilizando la energía almacenada en el banco de supercondensadores, que energice equipamiento auxiliar como luces o electrónica de control, a través de un convertidor DC/DC que adapte los niveles de voltaje.

Estos convertidores DC/DC son típicamente de potencias bajas, entre 50 W y 150 W, con salidas múltiples (12 V, 24 V, 48 V, ...), dependiendo de los requerimientos del equipo auxiliar.

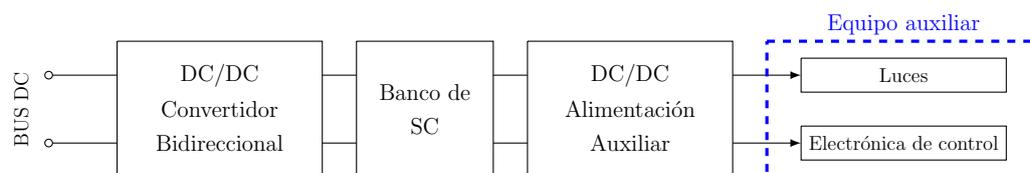


Figura 5.4: Alimentación a sistema auxiliar con SC.

### 5.2.1. Flujo de energía

La Figura 5.5 indica la energía que fluye desde la red y desde el SC hacia el motor. Cuando el SC no está completamente cargado, se descarga en cuanto el motor comienza a consumir energía. La Figura 5.6 muestra el SC cargándose cuando el motor genera energía.

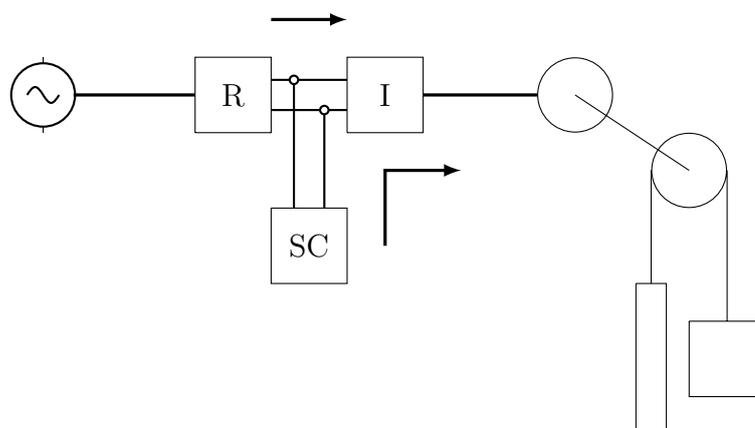


Figura 5.5: Diagrama de Flujo de energía.

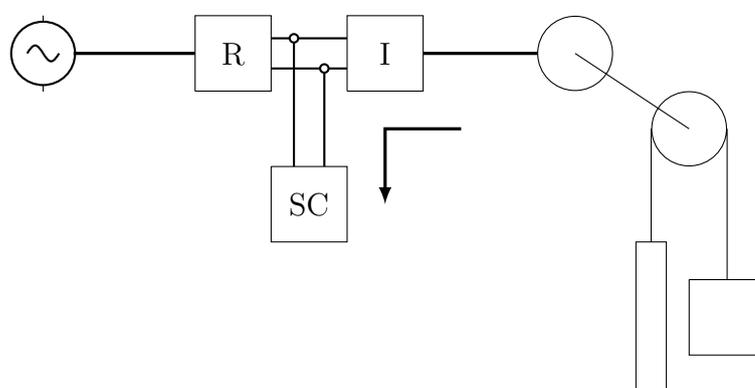


Figura 5.6: Diagrama de Flujo de energía.

### 5.2.2. Convertidor DC-DC Bidireccional

El convertidor DC-DC de la Figura 5.7 es un tipo de convertidor eléctrico que vincula el voltaje en el bus de continua del variador de frecuencia, con el voltaje en el banco de supercondensadores. Tanto en el proceso de carga como en el de descarga de los supercondensadores, este convertidor permite el flujo de potencia en ambas direcciones.

A continuación se explicará su funcionamiento. El lector deberá tener conocimientos básicos de electrónica de potencia, específicamente sobre convertidores DC/DC. De ser necesario, consultar bibliografía que se adjunta [31].

Cuando  $S_2$  está abierta,  $S_1$  se cierra y abre periódicamente y el convertidor funciona en su modo *Boost*. El supercondensador estará en su ciclo de descarga durante un período  $T$ . Se define  $t_{on}$  como el tiempo en que la llave  $S_1$  está cerrada, y  $t_{off}$  el tiempo en que la llave está abierta. Entonces, se cumple lo siguiente:

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (5.3)$$

Por definición, el ciclo de trabajo es la proporción de tiempo en que la llave

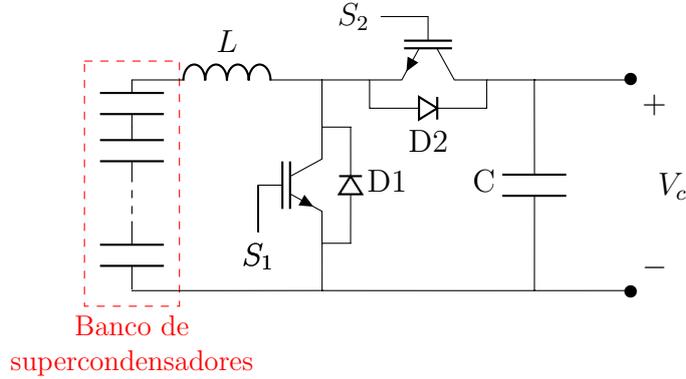


Figura 5.7: Convertidor Buck-Boost.

está cerrada con respecto al período.

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} \quad (5.4)$$

Cuando  $S_1$  está cerrada, el voltaje sobre la bobina es  $V_L = V_{sc}$ . Sin embargo, cuando  $S_1$  está abierta, el voltaje sobre la bobina adopta el valor  $V_L = V_{sc} - V_c$ .

El valor medio del voltaje en la bobina debe ser nulo en régimen estacionario, por lo que se obtiene la igualdad de la Ecuación 5.5. En conjunto con las Ecuaciones 5.4 y 5.3, se deduce que la transferencia del convertidor en este modo de conducción, es la que muestra la Ecuación 5.6.

$$\langle V_L \rangle = V_{sc} \cdot t_{on} + (V_{sc} - V_c) \cdot t_{off} = 0 \quad (5.5)$$

$$\boxed{\frac{V_c}{V_{sc}} = \frac{1}{1 - \delta}} \quad (5.6)$$

Si ahora  $S_1$  se mantiene abierta, y es  $S_2$  quien cambiará su posición de cerrado a abierto de igual manera que lo hacía  $S_1$  antes, el convertidor estará funcionando en su modo *Buck*. Observar que esta versión bidireccional de este convertidor ahora intercambia la entrada con la salida. El supercondensador ahora estará en su ciclo de carga. Cuando  $S_2$  esté cerrada, el voltaje sobre la bobina será  $V_L = V_{sc} - V_c$ , y cuando esté abierta,  $V_L = V_{sc}$ . Procediendo de igual manera, se llega a la expresión de la Ecuación 5.7 para la transferencia del convertidor en el modo de conducción *Buck*.

$$\boxed{\frac{V_{sc}}{V_c} = \delta} \quad (5.7)$$

Es habitual el uso de convertidores DC-DC no aislados debido a su alta eficiencia, confiabilidad, y pocas pérdidas. Además, en cuanto a tamaño y costo, son más pequeños y más baratos que otros convertidores, haciéndolos ideales para este tipo de aplicación.

### 5.2.3. Motor de Imanes Permanentes

En esta configuración, el motor PMSM es alimentado por un inversor como se muestra en la Figura 5.8. El PMSM tiene sus bobinados estáticos conectados en estrella, y los imanes permanentes están ubicados en el rotor.

Su funcionamiento es similar al motor de continua; el voltaje inducido es proporcional a la velocidad, y el torque es proporcional a la corriente de armadura.

En un PMSM, los campos rotóricos y estáticos se mantienen estacionarios uno respecto del otro. Como no requiere de escobillas, se utiliza un inversor quien ocupa su rol.

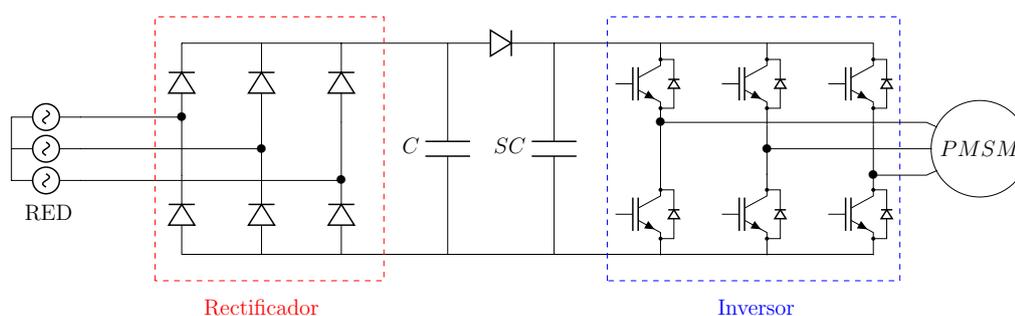


Figura 5.8: Esquema de conexión del motor alimentado de un inversor.

## 5.3. Baterías

Para esta aplicación el uso de baterías como dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica ha ido en desuso en los últimos tiempos, esto debido a las desventajas que presentan frente a los supercondensadores. Aún así, siguen siendo una opción viable en la regeneración de energía, y en esta sección se mostrarán algunas ventajas de utilizarlas.

### 5.3.1. Baterías de litio

Las baterías de litio se conforman por varias celdas que contienen dos electrodos (ánodo y cátodo) inmersos en un líquido conductor. Este líquido (denominado electrolito) es una sal de litio. Cuando la batería está cargada y es conectada alimentando un aparato, la energía es liberada, mientras que cuando se conecta un cargador en bornes de la batería, la misma se carga [25].

## Capítulo 5. Métodos Regenerativos

Hay varios tipos de baterías de litio dependiendo de la composición del cátodo. Todas tienen gran densidad de potencia y energía, y por ello son utilizados en sistemas con potencias elevadas.

Como desventajas a mencionar, las baterías de litio son caras para este tipo de aplicación, aún más que las baterías de estado sólido, y son peligrosas si se usan fuera de su rango de temperatura o voltaje de operación, necesitando de un caro sistema de mantenimiento [2], como el BMS (*Battery Management System*), que se encarga no solo de controlar la situación de cada celda en cada momento, sino también grandes degradaciones de la batería.

### 5.3.2. Baterías de estado sólido

Las baterías de estado sólido tienen el mismo funcionamiento que las baterías de litio, la principal diferencia está en el electrolito, que en este caso es un material sólido, como cristal u oro envuelto en manganeso inmersos en un gel [25].

Este tipo de baterías tiene una densidad de energía mucho mayor que los supercondensadores, y su principal ventaja es que son baratas, además de ser una tecnología muy conocida y testeada. Sin embargo, para un mismo requerimiento de potencia, las baterías de estado sólido son muy grandes e ineficientes en comparación con los supercondensadores [2].

En la Tabla 5.1 se comparan algunas características de las baterías de litio y de estado sólido, en conjunto con los supercondensadores.

Atributo	Unidad	SC	Litio	Estado sólido
Vida útil	Ciclos	> 500,000	1000-2000	500
Potencia específica	W/kg	10000	1000-3000	200
Energía específica	Wh/kg	5	100-200	40-80
Costo por kWh	U\$S	24000	600-2400	240
Temp. Operación	°C	-40 ... 65	0 ... 50	-20 ... 100
Eficiencia	%	98	95	80

Tabla 5.1: Comparación entre elementos de almacenamiento de energía. Fuente [25].

Para este tipo de aplicación, se necesitan dispositivos que sean altamente eficientes, con gran densidad energía, y un alto número de ciclos de carga y descarga. En cuestión de costo por kWh, los supercondensadores no pueden competir con las baterías. Sin embargo, en cuanto a U\$S por kW, los supercondensadores pueden costar 1/4 de lo que cuestan las baterías de litio [28].

## 5.4. Inversores de Interconexión a la Red

Ya observamos la posibilidad de almacenar energía eléctrica para usos futuros de acuerdo a los requerimientos del ascensor. Muchas veces esto implica módulos

## 5.4. Inversores de Interconexión a la Red

grandes de baterías o supercondensadores, los cuales sufren a su vez degradación con el tiempo.

Es de interés estudiar la posibilidad de devolver la energía a la red en lugar de almacenarla. La forma más innovadora de hacerlo, y sin duda la más usada, es con la implementación de inversores interconectados con la red.

Un inversor es un dispositivo eléctrico capaz de convertir corriente continua en corriente alterna; con transformadores, llaves y circuitos de control, es posible lograr cualquier voltaje y cualquier frecuencia, dentro de sus límites constructivos.

Debido a la imposibilidad que tienen los rectificadores de devolver energía a la red, se necesitan inversores que desvíen la energía pasando por alto los rectificadores. Durante el frenado dinámico, el inversor transforma el voltaje de continua que viene aumentando en alterna, e inyecta corriente a la red.

El esquema de conexión típico utilizado en ascensores convencionales es el que se muestra en la Figura 5.9. Allí, toda la energía sobrante se disiparía en la resistencia de frenado. La idea principal en esta sección, es sustituir el bloque marcado en rojo por un bloque que permita que la energía sea devuelta a la red. Para ello se implementa el circuito de la Figura 5.10.

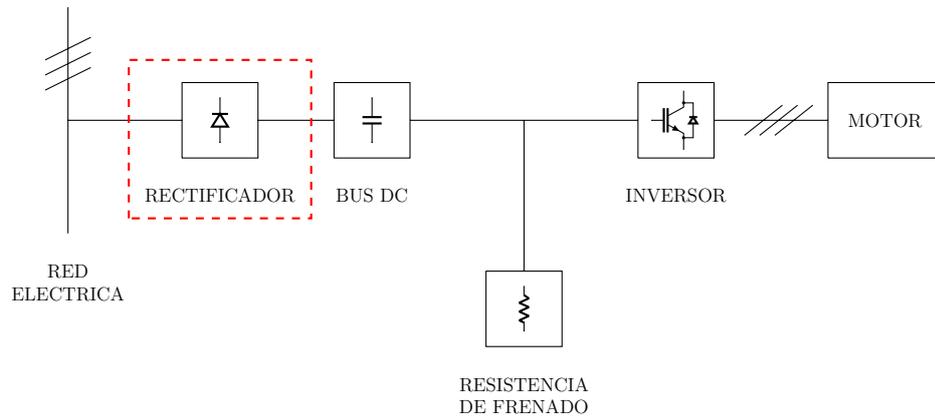


Figura 5.9: Esquema típico en ascensor convencional.

### 5.4.1. Principio de Funcionamiento

Como se mencionó en secciones anteriores, en un ascensor convencional el control de velocidad se hace mediante un variador de frecuencia. Este irá conectado a la red eléctrica por un lado, y al motor del ascensor por otro. Además, deberá estar conectado a la resistencia de frenado, la cual es esencial para que el variador funcione correctamente, disipando la energía sobrante cuando el motor funciona como generador.

El rectificador trifásico no permite conducción de corriente bidireccional, es por ello que se necesita modificar este bloque por uno que permita el pasaje de co-

## Capítulo 5. Métodos Regenerativos

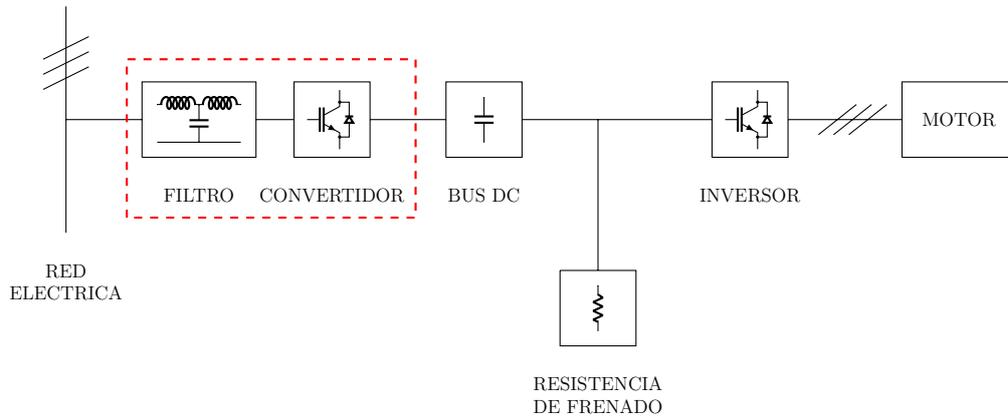


Figura 5.10: Esquema a implementar.

riente alterna a continua y viceversa, logrando de esta manera devolver la energía sobrante a la red.

Será necesario además, la implementación de un filtro que atenúe corrientes armónicas de altas frecuencias, mejorando la calidad de la onda. La Figura 5.11 muestra el esquema a implementar.

El sistema cuenta con un puente de seis llaves IGBT con sus respectivos diodos en antiparalelo. De esta manera, cuando el motor no está regenerando energía, puede alimentarse por la red mediante los diodos, y cuando funcione como generador, controlando las llaves mediante un control PWM (*Pulse Width Modulation* por sus siglas en inglés), se pueda generar un voltaje sinusoidal que coincida con la de la red eléctrica, y una onda de corriente que cumpla con las normativas de inyección de corriente a la red. El filtro a instalar juega un rol principal en este último requerimiento.

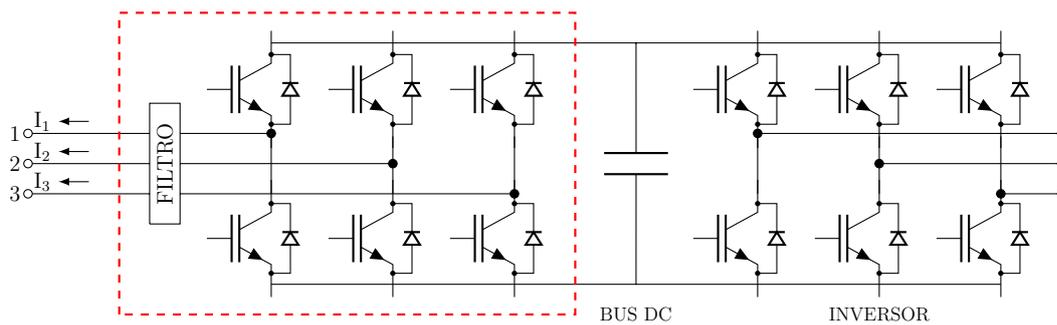


Figura 5.11: Circuito a implementar para lograr un flujo de energía bidireccional.

### 5.4.2. Control

La manera de controlar el sistema implementado, es manejando el voltaje en el bus de continua. La energía almacenada en el bus de continua es la de la ecua-

## 5.4. Inversores de Interconexión a la Red

ción 5.8. Sabiendo que la potencia se determina como la derivada de la energía, obtenemos la relación 5.9.

$$E_{bus} = \frac{1}{2} C_{bus} V_{bus}^2 \quad (5.8)$$

$$P = \frac{dE_{bus}}{dt} = (C_{bus} \cdot V_{bus}) \frac{dV_{bus}}{dt} \quad (5.9)$$

Comparando el voltaje en el bus de continua con un valor de referencia, se obtienen distintas consignas de potencia de acuerdo a la ecuación anterior, de manera que si el voltaje en el bus de continua es menor que la de referencia, se absorba potencia activa, y si el voltaje es mayor que el deseado, se deberá ceder potencia a la red.

El alcance de este proyecto no abarca la implementación del lazo de control de voltaje en el bus de continua.

### 5.4.3. Filtro

Como se mencionó anteriormente, la principal función del filtro es atenuar los armónicos de corriente de alta frecuencia para mejorar la forma de onda.

El filtro es inductivo-capacitivo LCL como se muestra en la figura 5.12. Las ventajas de usar este tipo de filtro frente a uno puramente inductivo, es que se necesitan inductancias más chicas, provocando menores caídas de voltaje, y un menor valor de THD (distorsión armónica total). Hay que tomar ciertas precauciones con la elección del filtro ya que presenta resonancias y por tanto necesitará resistencias de amortiguamiento.

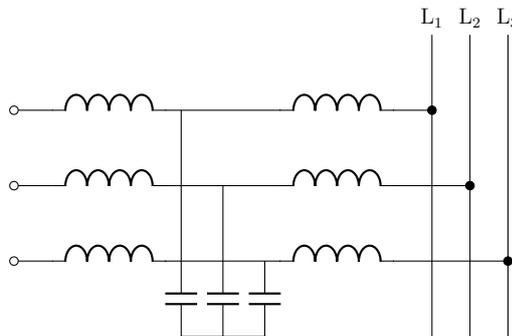


Figura 5.12: Filtro LCL.

Los inversores de interconexión a la red presentan grandes ventajas frente a los supercondensadores debido a que los primeros no disipan energía en los tiempos de espera, no se degradan tanto con el tiempo, ni requieren capacitancias enormes para edificios grandes que lo puedan necesitar. Sin embargo, los supercondensadores a diferencia de este tipo de inversores, no causan problemas de distorsión armónica en la red, lo que ocasiona problemas en la red y reduce la vida útil de los transformadores [4].

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 6

## Dispositivos de regeneración de energía.

Entre todas las posibilidades que se pueden encontrar en mercado, se destacan algunos de los dispositivos más importantes, tanto en su practicidad a la hora de ser aplicados en diversas instalaciones con mínimas modificaciones, como su gran eficiencia en la conversión de energía. Se mencionan algunos a continuación:

### 6.1. ERS 2G

Este dispositivo fabricado por *Epic Power*, es un convertidor bidireccional DC/DC que opera a partir del almacenamiento de energía en súper capacitores. La gran ventaja que tiene es que basta con ser conectado en el bus DC de la instalación existente para convertirla en una aplicación regenerativa, por lo cual su instalación es muy sencilla.

Dado que no realiza inyección de energía a la red, no se requiere ningún tipo de modificación en el punto de conexión con el distribuidor de energía, ni presenta introducción de armónicos.

Otro aspecto favorable es su gran eficiencia en la conversión de energía, la que ronda el 98 %, pudiéndose utilizar un sólo equipo para motores de hasta 15 kW de potencia.



Figura 6.1: Imagen del dispositivo ERS 2G [27]

Características técnicas  Soluciones disponibles para todo tipo de cargas y recorridos

	ERS 2G	ERS 2G x n (paralelizable)
Óptimo para ascensores de	Hasta 15 kW	Hasta 15 kW x n
Energía almacenada	60000 Ws	60000 Ws x n
Potencia nominal	6300 W	6300 W x n
Eficiencia	Hasta 98%	
Standby	< 2 W	
Allied with the sun	Disponible con conexión a paneles solares	

Figura 6.2: Tabla extraída del Brochure de ERS 2G. Fuente [27].

## 6.2. AVRy

Este dispositivo es un driver de motor fabricado por *Gefran*. El mismo incluye la función de regeneración de energía, por lo tanto no es aplicable a instalaciones ya existentes, dado que requeriría del reemplazo del driver existente por esta nueva unidad.

Este dispositivo cuenta con una eficiencia que ronda 94 % a 96 %, que en conjunto con su capacidad de presentar a la red un factor de potencia unitario, y su baja introducción de armónicos en la red ( $\leq 4\%$ ), brindan una fuerte motivación a la hora de diseñar una instalación.

Este tipo de inversor cuenta con tres modelos, los cuales son capaces de alimentar motores de alimentación en 400 V con potencias de 7.5 kW, 11 kW y 17 kW respectivamente.



Figura 6.3: Imagen del inversor AVRy. Fuente [17].

### 6.3. Yaskawa R1000

Drive Type		AVRy 1 1425	AVRy 1 2545	AVRy 2 3360
U <sub>LN</sub> AC Input voltage	[V]	3 x 400 V -15%, 3 x 460 +15%	3 x 400 V -15%, 3 x 460 +15%	3 x 400 V -15%, 3 x 460 +15%
F <sub>LN</sub> AC Input frequency	[Hz]	50/60 Hz ±5%	50/60 Hz ±5%	50/60 Hz ±5%
cosφL1		≈ +1 (motor), ≈ -1 (generator) better than ± 0.95		
Rated input power (see motor side output load cycle)	[kVA]	13	22	29
Rated input current I <sub>LN</sub> @ U <sub>LN</sub> = 400Vac	[AAC]	18	32	42
THD of I <sub>LN</sub> (ref.to I <sub>L1</sub> and @ I <sub>SC</sub> =100)	[%]	≤4	≤4	≤4
Efficiency	[%]	≥94 ... 96	≥94 ... 96	≥94 ... 96
Modulation type		Space vector PWM	Space vector PWM	Space vector PWM
Default modulation frequency	[kHz]	16	8	8

Figura 6.4: Tabla extraída del catalogo de AVRy. Fuente [17].

### 6.3. Yaskawa R1000

Este dispositivo es un recuperador de energía de frenado, el cual funciona tomando la energía que se disiparía en la resistencia de frenado e inyectándola a la red para que pueda ser reutilizada.



Figura 6.5: Imagen del dispositivo de frenado regenerativo R1000. Fuente [33].

Este tipo de dispositivo queda excluido del marco legal nacional (ver Capítulo 9), por lo cual no sería posible su implementación, en vista de que no es un dispositivo de generación a partir de fuentes renovables.

### 6.4. Yaskawa D1000

Este dispositivo es un driver de motor capaz de regenerar energía. Devuelve la energía de la resistencia de frenado a la red, pudiendo inyectar energía con factor de potencia unitario, y con introducción de armónicos inferior al 5 %.

Nuevamente, este dispositivo de regeneración no se encuentra contemplado en la normativa vigente, por lo cual resulta imposible de aplicar a una instalación.

## Capítulo 6. Dispositivos de regeneración de energía.



Figura 6.6: Imagen del dispositivo de frenado regenerativo D1000. Fuente [34].

Se resumen a continuación las principales características de cada equipo, destacando sus ventajas y desventajas:

Equipo	ERS 2G	R1000	AVRy	D1000
Función	Recuperación de energía	Recuperación de energía de frenada	Driver regenerativo	Driver regenerativo
Aspectos Positivos	$\eta$ hasta 98 %	—	$\eta \geq 94$ %	—
	No inyecta a Red	Opera como R	Driver completo	Driver completo
	Simple conexión	Elimina R	THD $\leq 4$ %	THD $\leq 5$ %
Aspectos Negativos	Costo elevado	Devuelve a Red	Reemplaza Driver	Reemplaza Driver
	—	Recupera sólo energía de frenada	Devuelve a Red	Devuelve a Red
	—	—	—	—
Costo equipo	US\$ 2300	US\$ 900	—	US\$ 1500
Costo total	US\$ 3270	US\$ 1280	—	US\$ 2130

Tabla 6.1: Comparación de equipos.

A partir de los datos resumidos en la Tabla 6.1, se puede concluir que la opción más rentable sería la del dispositivo D1000 de Yaskawa, dado que el mismo cuenta con todas las funciones incluidas, incluso la de regeneración. Lamentablemente, por disposiciones legales, estos dispositivos no pueden entregar la energía regenerada a la red. Aún así, se podría analizar la posibilidad de alimentar otras cargas de la instalación.

Se debe de aclarar que todas las instalaciones estudiadas cuentan con variadores no regenerativos de la serie **L1000E**. Su costo en el mercado nacional ronda los US\$ 650, a lo que se le debe adicionar gastos extras e IVA. Por lo tanto, el valor final rondaría US\$ 930.

Estos gastos extras y el impuesto al valor agregado (IVA), se establecen como el 20 % y el 22 % del costo del equipo respectivamente. Por lo tanto, también deben de ser aplicados a los dispositivos regenerativos, con el fin de establecer su costo total en el mercado nacional, lo que se resume al final de la Tabla 6.1.

# Capítulo 7

## Campaña de mediciones

La campaña de medición consiste en la medida de varios parámetros eléctricos de interés durante varios días, de forma tal de poder estudiar el consumo del motor con resultados empíricos. Se eligieron 3 edificios diferentes de la ciudad de Montevideo, en los cuales se encuentran instalados sistemas no regenerativos para el control de los ascensores.

Los ascensores cuentan con variadores de frecuencia de la compañía *Yaskawa* modelo CA-L1000E, el cual permite establecer una comunicación con una PC a través de un cable USB (tipo AB). Además, Yaskawa provee un software llamado *DriveWizardPlus*, el cual es intuitivo y agrega sencillez y dinamismo al momento de ser usado por el usuario. Dicho software se puede utilizar para ajustar los parámetros del variador, y permite mostrar las siguientes magnitudes en tiempo real en la ventana “Trend Recorder”:

- Corriente de salida del variador
- Voltaje de salida del variador
- Potencia de salida del variador
- Velocidad del motor
- Voltaje del bus de continua
- Torque de referencia

El software mencionado puede exportar archivos de tipo .csv de 50.000 muestras, lo que aproximadamente son 90 minutos. Sería inviable exportar los datos cada 90 minutos durante una semana o un mes entero, por lo que se debió encontrar un método capaz de automatizar el guardado de las medidas. Se implementó un automatismo para que la computadora guarde las medidas en períodos de tiempo ajustables, a ingresar por el usuario. En la sección 7.2 se explica la forma en la que se llevó a cabo el programa.

Luego de esto, se realizó un programa de Matlab con el objetivo de poder determinar los pisos recorridos por el ascensor, la cantidad de pasajeros que tuvo en cada viaje y cuánta energía se podría haber recuperado si se contaba con un driver regenerativo. Para eso se tuvieron que analizar las medidas obtenidas contrastándolas con los datos de cada edificio.

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

Se debe resaltar que se contaron con vastos casos de prueba, con los cuales se pudo probar el correcto funcionamiento del código realizado en Matlab. Se corroboró la detección de los pisos recorridos y la carga del ascensor con varios casos conocidos. Por otro lado, se demostró que la potencia medida por el variador es la correcta, realizando la medida de potencia a partir de la construcción un circuito presentado en la Sección 7.5.

### 7.1. Presentación de los edificios estudiados

Los edificios estudiados se escogieron en acuerdo con la empresa nacional de ascensores. Se optó por edificaciones de usos específicos (residenciales y oficinas) más adecuados, de forma de brindar un panorama lo más representativo posible de lo que es el uso diario. Se optó por dos edificios residenciales y uno de oficinas.

#### 7.1.1. Edificio #1

El primer edificio en conformar la campaña de medición, es uno de tipo residencial. El mismo cuenta con una altura de aproximadamente 37 m. Consta de 9 paradas, planta baja, 7 pisos y un subsuelo dedicado a garaje.

Este edificio tiene un total de 4 ascensores, ubicados de forma que dos de ellos dan a un ala del edificio, y los otros dos a la opuesta. Los mismos tienen una velocidad máxima de 60 mpm (metros por minuto), con un recorrido de la cabina de 32,24 m.

Se detallan algunos de los parámetros más relevantes:

EDIFICIO 1	
# Paradas	9
Potencia del motor	5,3 HP
Voltaje de la red	380 V
Corriente de la red	25 A
Capacidad máxima de la cabina	8 personas
Peso de la cabina	700 kg
Peso del contrapeso	1000 kg
Velocidad de régimen	1 m/s
Tipo de cable	8x19 + 1AA
# Cables x Diámetro	6x6 mm

Tabla 7.1: Características del edificio #1.

## 7.1. Presentación de los edificios estudiados

### 7.1.2. Edificio #2

El segundo edificio donde se realizó la campaña de mediciones fue uno de oficinas. El mismo tiene una altura aproximada de 37 m, y consta de 11 pisos y planta baja.

Este edificio tiene en total dos ascensores, cada uno con una capacidad de 4 pasajeros, y con una velocidad máxima de 60 mpm (metros por minuto), teniendo un recorrido de la cabina de 31,25 m.

En su diseño se contempló que realizara gran número de viajes por día, con baja carga, por eso la elección de su reducida capacidad.

EDIFICIO 2	
# Paradas	12
Potencia del motor	5,3 HP
Voltaje de la red	380 V
Corriente de la red	25 A
Capacidad máxima de la cabina	4 personas (400 kg)
Peso de la cabina	450 kg
Peso del contrapeso	650 kg
Velocidad de régimen	1 m/s
Tipo de cable	8x19 + 1AA
# Cables x Diámetro	6x6,5 mm

Tabla 7.2: Características del edificio #2.

### 7.1.3. Edificio #3

El tercer edificio en el que se midió fue uno de tipo residencial. El mismo cuenta con una altura de 32,63 m. Tiene 11 pisos, planta baja y subsuelo.

En total son dos ascensores, y se los diseñó de forma de ser más rápidos en sus recorridos (ajuste de velocidad en 90 mpm). Es por esto que el motor es de una potencia mayor que el primer edificio medido.

EDIFICIO 3	
# Paradas	13
Potencia del motor	8 HP
Voltaje de la red	380 V
Corriente de la red	25 A
Capacidad máxima de la cabina	8 personas (600 kg)
Peso de la cabina	650 kg
Peso del contrapeso	950 kg
Velocidad de régimen	1,5 m/s
Tipo de cable	8x19 + 1AA
# Cables x Diámetro	6x6 mm

Tabla 7.3: Características del edificio #3.

## 7.2. Implementación del automatismo para el guardado de las medidas

La implementación del automatismo para el guardado de las medidas se desarrolló en la JVM de Java (“Java Virtual Machine”), más precisamente en el lenguaje Kotlin.

Este lenguaje tiene la ventaja que gracias a su tipo de compilación, se puede llegar a ejecutar en cualquier computadora sin necesidad de instalar ningún software adicional, ya que se corre en el símbolo del sistema (más conocido como cmd).

Primero se investigó de qué forma se podía realizar la extracción de datos automáticamente. Para eso se observó que el software *DriveWizardPlus* tiene atajos en el teclado para la mayoría de sus funcionalidades, por lo que si se lograra emular el funcionamiento del teclado mediante el programa cada cierto tiempo, se lograría exportar los datos de forma automática. Efectivamente se consiguió realizar lo mencionado, aunque a medida que el programa funcionaba se fueron detectando algunos problemas.

La desventaja de este programa es que no tiene una realimentación del archivo guardado, es decir, solamente “presiona” teclas, por lo que no se logra identificar si el archivo se guardó o no. Esta fue la mayor complicación que se tuvo en esta parte, pues toda ventana emergente que apareció en pantalla, hizo que las teclas apretadas no realizaran ninguna acción.

Durante la campaña de medidas en los dos primeros edificios, se tuvo que supervisar el programa en todo momento, verificando que este funcione de forma correcta. Para llevar a cabo dicha tarea, se debió acceder a la computadora de forma remota. Esto se debe a que la PC se mantuvo conectada al variador de frecuencia, y debido a la emergencia sanitaria, no se podía acceder diariamente al edificio.

### 7.3. Procesamiento de las medidas

La herramienta adecuada para cumplir este propósito es TeamViewer. Este es un software informático privado de *fácil acceso*, que permite conectarse remotamente a otro equipo. Además, se tuvo que colocar un dispositivo capaz de brindar internet a la computadora continuamente.

Durante el tiempo en el que se midió en los primeros dos edificios, se logró mejorar el programa, y para el último edificio a medir, se logró un óptimo funcionamiento del mismo.

El código implementado tiene tres funciones importantes además del programa principal. La primera se llama **presionarTecla** que, como indica su nombre, su función es emular en el sistema que una tecla fue presionada. A continuación se muestra el código de la misma, la cual recibe como entrada una o varias teclas que se buscan presionar.

```
private var robot: Robot = Robot()

fun presionarTecla(vararg keys: Int) {
    keys.forEach(robot::keyPress) // Se presiona las teclas introducidas
    sleep(Duration.ofMillis(100)) // Permanece 100ms la tecla presionada
    keys.forEach(robot::keyRelease) // Se deja de presionar la tecla
    sleep(Duration.ofMillis(500)) //Se esperan 500ms
}
```

Una vez creada esta función solamente se debe indicar en el programa principal que cada cierto tiempo se realice una cierta secuencia de teclas de forma tal de poder guardar los archivos de forma automática. La otra función se realizó con el objetivo de inicializar todas las letras y símbolos del teclado.

Además de la secuencia de teclas que se debió hacer para el guardado, se le tuvo que poner un nombre a los archivos exportados. Se decidió que el mejor nombre debía indicar el instante en que se guarda, y se utilizó el formato *Epoch Time*<sup>1</sup>.

### 7.3. Procesamiento de las medidas

Una vez recabadas las medidas se procedió a procesar los datos. Como se mencionó en la introducción del presente capítulo, el variador exporta un archivo de tipo .csv con las medidas adquiridas. Este tipo de archivo tiene la característica de que los valores están separados por comas formando una especie de tabla. En la Figura 7.1 se muestra un pequeño fragmento del comienzo de un archivo exportado por el dispositivo nombrado. Las últimas dos columnas muestran el torque de referencia y el voltaje del bus DC

---

<sup>1</sup>Este tipo de descripción de instantes de tiempo se define como la cantidad de segundos transcurridos desde la medianoche UTC del 1 de enero de 1970, sin contar segundos intercalares.

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

```
Time,S1 : U1-03 Output current,S2 : U1-05 Motor speed,S3 : U1-06 Output voltage,S4 : U1-08 Output power,S5 : U1-09

19:33:04:261, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 558.00
19:33:04:314, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 559.00
19:33:04:367, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 558.00
19:33:04:423, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 559.00
19:33:04:478, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 558.00
19:33:04:531, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 559.00
19:33:04:585, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 559.00
19:33:04:644, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 559.00
19:33:04:697, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 559.00
```

Figura 7.1: Parte de un archivo exportado por el variador.

Notar que además de exportar los valores medidos, en la primer fila se encuentra el nombre de cada magnitud. Al finalizar la campaña de medición se obtuvieron más de 2 GB de archivos exportados. Previendo esta situación, se construyó un código en Matlab capaz de procesar los datos de forma automática.

Se comenzó importando las magnitudes en vectores diferentes interpretando el orden de exportación del variador. Algo a tener en cuenta es que, como se puede apreciar en la Figura 7.1, la columna de tiempo se muestra con el formato hh:mm:ss:FFF, por lo que este se debió traducir a segundos, de forma tal de poder utilizarlo para graficar y utilizar los datos obtenidos.

La finalidad del código es poder calcular los pisos recorridos por el ascensor, la carga que tuvo en cada viaje (número de personas que subieron) y qué porcentaje de energía se podría haber recuperado en caso de implementar un driver de frenado regenerativo. Para poder calcular esto se usó el vector de tiempo, la curva de velocidad, el torque de referencia calculado por el variador y la potencia de salida del mismo. En las próximas secciones se explicará cómo se manipularon estas variables de interés.

### 7.3.1. Análisis de la curva de velocidad

Los valores de la curva de velocidad se encuentran expresados como un porcentaje de una velocidad introducida en el variador, la cual puede ser la velocidad nominal del motor o no. En la Figura 7.2 se exhibe un ejemplo de la curva de velocidad de un viaje de planta baja al séptimo piso del primer edificio residencial medido.

Se puede apreciar que la curva mostrada en la Figura 7.2 es homóloga a la estudiada en el Capítulo 4.2, siendo más precisos, es similar a la de la Figura 4.5 ubicada en el capítulo mencionado. De todas formas, se notan dos diferencias que no se deben pasar por alto. Se visualiza que cuando el motor deja de acelerar para comenzar a funcionar a velocidad constante se tiene un pequeño sobretiro, algo similar ocurre cuando deja de desacelerar. Esto se relaciona con el  *jerk*  del ascensor.

### 7.3. Procesamiento de las medidas

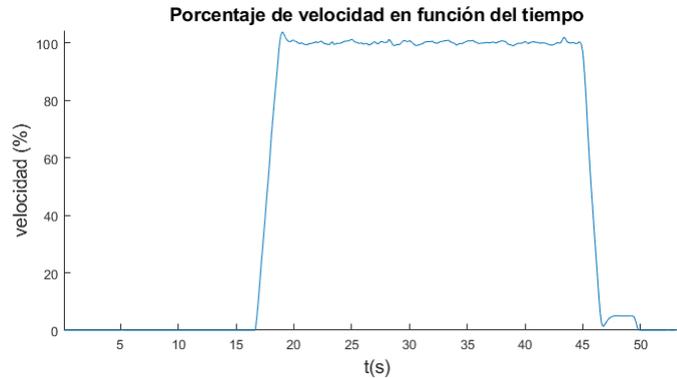


Figura 7.2: Porcentaje de velocidad en función del tiempo.

El *jerk* se define como la derivada de la aceleración con respecto al tiempo, y es la sensación de tirón que se puede notar cuando varía la aceleración. Este parámetro refleja gran parte del confort de los pasajeros en el viaje, dado que con un *jerk* elevado se percibirá un gran tirón, lo que en la curva de velocidad se traduce en un sobretiro mayor.

Un *jerk* elevado en fase de aceleración puede ser causado por agarrotamiento del sistema de guiado contra la guía, inadecuado (excesivo) torque de arranque o, el ajuste de una curva de aceleración inadecuada. Por otro lado, en la fase de deceleración-parada, el *jerk* puede ocurrir por un incorrecto ajuste del freno electromecánico o por tener una curva de aceleración inadecuada en el variador [3].

En el primer edificio, la velocidad constante es la velocidad nominal del motor, la cual tiene un valor igual a  $n = 159$  rpm. Mediante la Ecuación 7.1 se calcula la velocidad de la cabina, recordando que el radio de la polea es  $r = 0.12$  m y que el sistema tiene un reductor de poleas 2:1.

$$v_{cabina} = \frac{2\pi r}{60} \cdot \frac{n}{2} = 1,0 \frac{m}{s} \quad (7.1)$$

Entonces, para este ejemplo el 100% de la curva de velocidad corresponde a  $1 m/s$ . Si se integra la velocidad de la cabina se obtiene la posición de la misma para todo tiempo, por lo que se logra saber el recorrido del ascensor. En la Figura 7.3 se muestra en verde el área debajo de la curva de velocidad integrada para obtener el recorrido.

Debido a que la velocidad siempre está dada en un porcentaje positivo, no es fácil deducir el sentido de giro del motor, es decir, si la cabina sube o baja. En ese caso el recorrido de la cabina siempre sería positivo, no pudiendo distinguir en qué piso se encuentra el ascensor.

Los viajes exhibidos son del primer edificio residencial, de planta baja al séptimo piso y vice versa. La segunda curva de velocidad debería ser negativa, de forma tal de que el recorrido retroceda nuevamente a cero. Esto conlleva a que la convención de signos que se va a utilizar sea la siguiente: cuando la cabina suba la

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

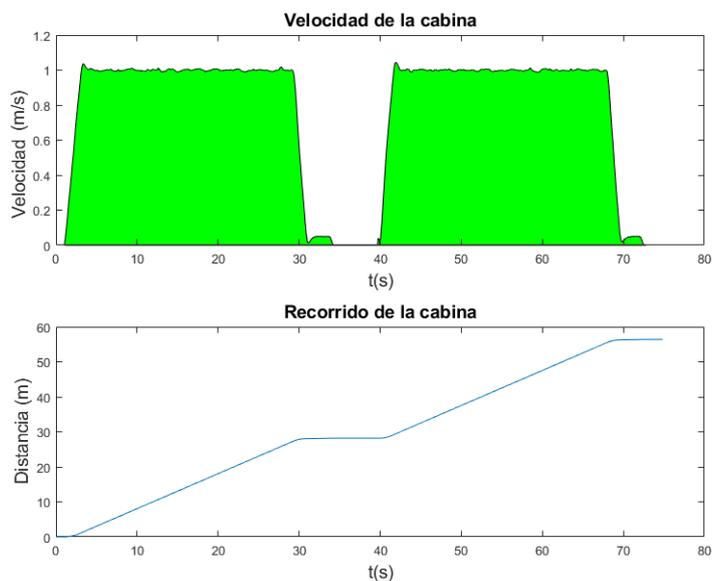
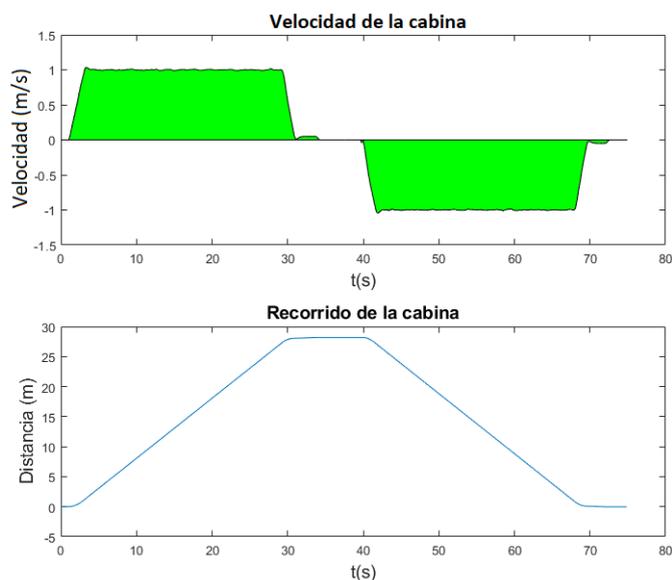


Figura 7.3: Velocidad y recorrido de la cabina sin corrección en el signo de la velocidad.

velocidad será positiva y cuando baje negativa. El recorrido descrito se muestra en la Figura 7.4.



54

Figura 7.4: Velocidad y recorrido de la cabina con corrección en el signo de la velocidad.

En los primeros dos edificios medidos, la curva de velocidad presentó la misma forma para todos los viajes posibles. Sin embargo, para el tercer edificio medido (el segundo residencial), esto no fue así. En dicho edificio, la velocidad de la cabina es de 1,5 m/s y la distancia entre pisos consecutivos es menor de la que existe en los

### 7.3. Procesamiento de las medidas

otros edificios, lo que provocó que la velocidad no alcance su máximo valor en los viajes entre pisos consecutivos. Además, en estos casos, la velocidad de nivelación tomó un papel más significativo que en los casos anteriores, dado que tiene una mayor duración.

En la Figura 7.5 se muestra la velocidad en los viajes de pisos consecutivos, desde el octavo hasta el décimo primer piso del edificio en cuestión, pudiéndose apreciar lo explicado en el párrafo anterior.

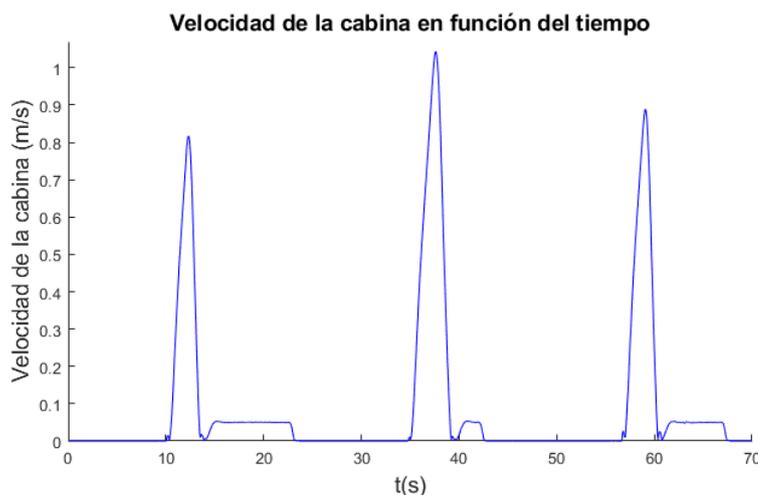


Figura 7.5: Velocidad de la cabina en pisos consecutivos para el tercer edificio medido.

Por último, es necesario mencionar que es inevitable cometer errores al calcular los recorridos de los viajes. Por ejemplo, en la Figura 7.4 el cálculo de la distancia recorrida en el primer viaje es 28,18 m, mientras que en el segundo es 28,21 m, es decir, se tiene una diferencia de menos de 3 cm.

Una tendencia que se ve es que esta diferencia se incrementa al aumentar la distancia recorrida por el ascensor, algo que era esperado. El caso límite es ir piso por piso en una dirección y luego hacer todo el recorrido del edificio en el sentido de giro opuesto. Este caso se estudió en el último edificio medido, y el resultado se muestra en la Figura 7.6.

En la Figura 7.6 se puede ver que el recorrido de la cabina no regresa a cero, es decir, la suma de los pisos consecutivos de todo el edificio no es igual a recorrer todo el edificio en un solo viaje. Para ser más preciso, la suma del recorrido yendo de a un piso es 34,02 m, mientras que en el recorrido largo es de 33,40 m, habiendo una diferencia de un poco más de 61 cm.

Si no se controla, esta diferencia se acumulará en cada viaje, llegando finalmente a valores equívocos e inaceptables. La mayor complejidad que se tuvo a la hora de realizar el código fue la de reducir esta diferencia a valores aceptables.

La forma de corroborar que la curva de velocidad devuelta por el variador es correcta, fue comparando las distancias obtenidas a partir de la integral de la curva

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

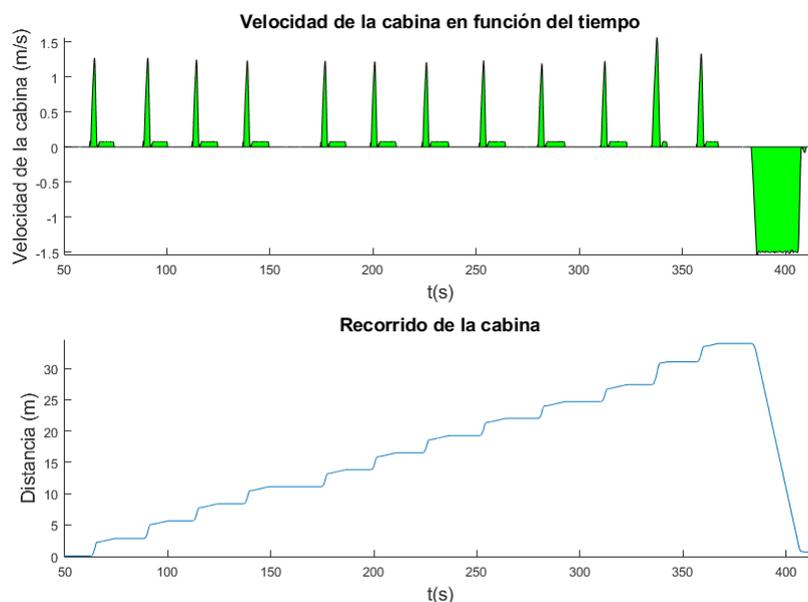


Figura 7.6: Velocidad y recorrido de la cabina en pisos consecutivos para el tercer edificio medido.

de velocidad con respecto a las distancias que indica el plano de cada edificio. La diferencia máxima obtenida fue de 50 cm entre el sexto y séptimo piso del primer edificio residencial medido.

En general se tuvo una diferencia menor al 6 % de la distancia indicada en el plano, lo que aproximadamente es 17 cm.

### 7.3.2. Análisis de la potencia de salida del variador

La potencia de salida es exportada por el variador en kW, y la convención de signos que utiliza el dispositivo es la siguiente: la potencia es positiva cuando el motor consume potencia, y negativa cuando genera.

En la Figura 7.7 se puede ver la potencia medida por el variador a lo largo de los dos viajes presentados en la sección anterior (la curva de velocidad de estos viajes se muestra en la Figura 7.3). Se recuerda que estas curvas son del primer edificio residencial, de un viaje vacío de planta baja al séptimo piso y vice versa.

En el primer viaje se puede ver que la potencia es negativa, lo que es coherente, dado que el ascensor está subiendo vacío, y como el peso del contrapeso es mayor al de la cabina, es la fuerza de gravedad la encargada de hacer que la cabina suba. En el segundo caso ocurre lo opuesto, la cabina debe bajar, por lo que el motor debe consumir potencia para poder realizar tal movimiento.

Integrando la potencia se obtiene la energía en función del tiempo, la cual se muestra en la Figura 7.8. En la figura se puede notar que la energía regenerada es alrededor de un 30 % de la energía consumida, con viajes en iguales condiciones

### 7.3. Procesamiento de las medidas

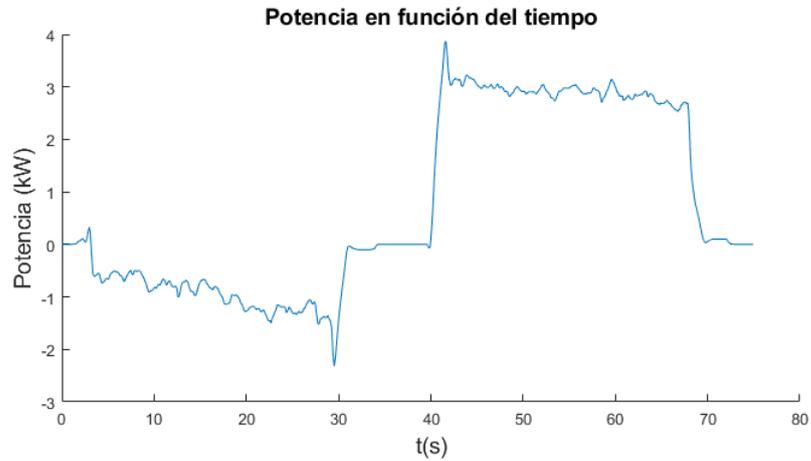


Figura 7.7: Potencia instantánea - viaje desde piso 0 a 7 - edificio #1.

de carga, resultado poco prometedor si de regeneración de energía se habla.

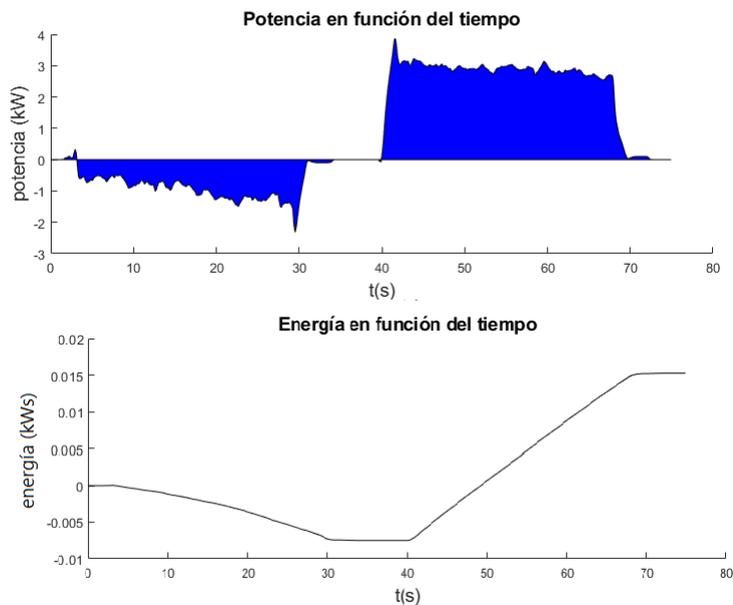


Figura 7.8: Potencia y energía instantánea - viaje desde piso 0 a 7 - edificio #1.

Como se desconoce la forma en que el variador realiza la medida de potencia, y hay tanta diferencia entre la potencia generada y la consumida por el motor, se buscó la forma de verificar que esta sea correcta, de forma tal de obtener resultados y conclusiones sólidas.

Luego de llevar a cabo la medida presentada en la Sección 7.5, se pudo corroborar que la potencia es efectivamente la que otorga el variador, y se dedujo que la causa de la diferencia entre la potencia consumida y la regenerada es la fricción.

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

La potencia medida es la potencia que fluye en el variador. Esto significa que cuando el motor consume potencia, las pérdidas consumidas por él y por el sistema mecánico también son medidas. Sin embargo, cuando el motor genera potencia, las pérdidas no son medidas dado que ya fueron disipadas.

### 7.3.3. Análisis del torque de referencia

La última magnitud utilizada para lograr los objetivos planteados fue el torque de referencia. Al igual que la velocidad del motor, el torque de referencia también está dado como un porcentaje de un torque impuesto en el variador, que en los casos estudiados es el nominal del motor. En la Figura 7.9 se presenta el torque de referencia en los viajes estudiados en las secciones anteriores, es decir, de planta baja al séptimo piso y vice versa.

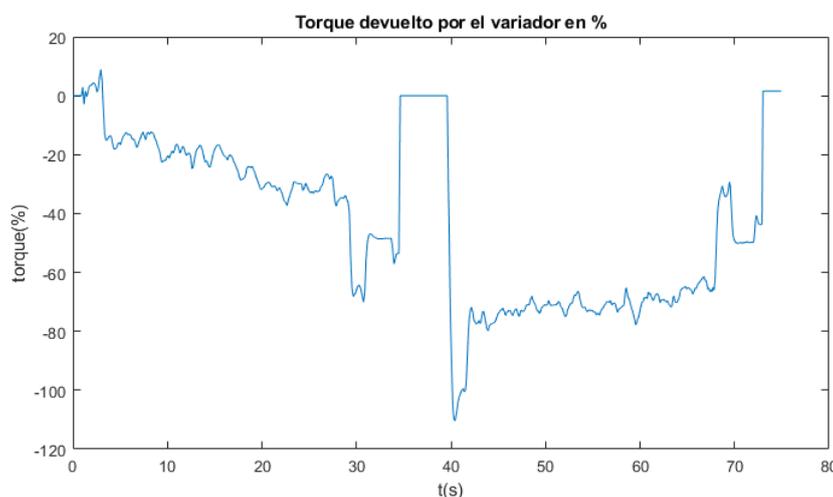


Figura 7.9: Torque devuelto por el variador (en porcentaje) en el primer edificio.

A diferencia de la velocidad, el torque sí presenta magnitud y signo. La convención utilizada por el variador en los primeros dos edificios es que el torque es positivo cuando la cabina sube y el peso de la cabina sumado al de su carga es mayor al del contrapeso. Sin embargo, en el tercer edificio la convención de signos es opuesta.

En ambos casos presentados, se ve que el torque es negativo. Para poder entender por qué en ambos casos se tiene el mismo signo se acude a la Ecuación 7.2, donde  $\tau$  es el torque de referencia del motor,  $P$  la potencia del variador y  $\omega$  la velocidad angular del eje.

$$\tau = \frac{P}{\omega} \quad (7.2)$$

En el primer caso la cabina sube con  $\omega > 0$ , pero la cabina se encuentra vacía, por lo que el motor regenera potencia ( $P < 0$ ). En el segundo caso, la potencia es positiva dado que la cabina baja vacía, entonces  $\omega < 0$ .

### 7.3. Procesamiento de las medidas

Se recuerda que  $\omega = 2\pi\frac{f}{p}$  siendo  $f$  la frecuencia de alimentación del motor y  $p$  la cantidad de pares de polos del mismo. Además,  $n = \frac{60f}{p}$  donde  $n$  es la velocidad expresada en rpm. A partir de esto se deduce la ecuación 7.3.

$$\tau = P \cdot \frac{60}{2\pi n} \quad (7.3)$$

En la Figura 7.10 se muestra el torque de referencia ya escalado por el torque nominal ( $\tau_{nom}=230$  Nm) y el torque calculado a partir de la Ecuación 7.3.

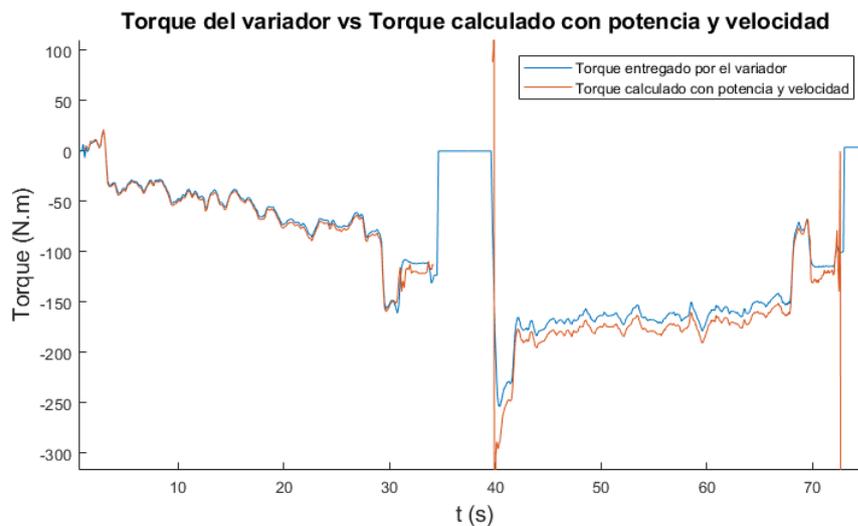


Figura 7.10: Torque entregado por el variador vs torque calculado con potencia y velocidad.

Al igual que en la potencia, el torque es mayor (en valor absoluto) cuando el motor consume potencia que cuando regenera. A través de la Ecuación 7.3 se puede deducir que si la potencia es menor el torque también lo va a ser, por lo que la deducción realizada en la Sección 7.3.2 es válida para esta parte.

Además, se puede apreciar que el torque va variando a lo largo del viaje, el peso de la cuerda explica en gran medida tal cambio; por ejemplo, en el primer viaje (sube del piso 0 al piso 7 vacío), cada vez se va acumulando más cable del lado del contrapeso, por lo que ocurre un mayor desbalance de las cargas y es correcto que el torque vaya aumentando en valor absoluto.

Es importante notar que cuando el ascensor baja vacío (segundo viaje) ocurre lo opuesto que en el caso anterior. Sin embargo, la variación no puede ser explicada completamente por la cuerda, dado que el aumento en valor absoluto del torque en el primer viaje es mayor que la disminución en el segundo. En la Sección 7.3.6 se profundizará sobre este tema.

#### 7.3.4. Sentido de giro del motor

Como fue dicho en la Sección 7.3.1, la velocidad otorgada por el variador siempre es positiva. Sin embargo, la potencia y el torque de referencia están dados con

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

signos, por lo que a partir de la Ecuación 7.2 es posible determinar el giro del motor.

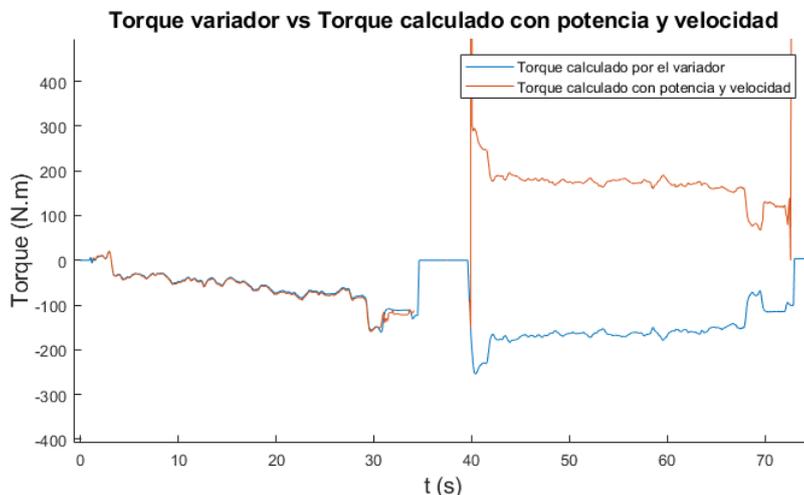


Figura 7.11: Torque calculado con potencia sin signo vs torque de referencia del variador.

La convención de signos utilizada es que si la cabina sube, la velocidad es positiva, y si baja es negativa. Por lo tanto, si el torque calculado a partir de la velocidad y potencia tiene el mismo signo que el torque de referencia del variador, la cabina sube, de lo contrario la cabina baja. En la Figura 7.11 se puede visualizar que en el primer caso la cabina sube, y en el segundo baja.

De todas maneras, para determinar el sentido de giro del motor no es necesario calcular el valor del torque; solo con su signo y el de la potencia se puede determinar completamente el sentido de giro. Si el torque y la potencia tienen el mismo signo, la velocidad debe ser positiva, de lo contrario la velocidad debe ser negativa. En la Figura 7.12 se exhibe el torque y la potencia de los viajes mostrados anteriormente.

### 7.3.5. Pisos recorridos y matriz de distancias acumuladas

Para determinar en qué piso se encuentra el ascensor, es necesario saber todas las distancias posibles de los viajes que se pueden realizar, y además se debe conocer si el ascensor sube o baja. En la Sección 7.3.4 se explicó cómo se determinó la dirección de giro del motor.

Se construyó una matriz  $A$  nombrada *matriz de distancias acumuladas*, con la que se pudo calcular todas las distancias posibles que la cabina puede recorrer. Se dará un ejemplo para un edificio de tres pisos (con planta baja), y luego se le agregará al edificio presentado un subsuelo, de forma de poder ver los cambios que se producen.

Sea  $D = \{d_{10}, d_{21}, d_{32}\}$ , donde  $d_{ij}$  es la distancia que hay entre el piso  $i$  y el  $j$  siendo  $j$  un piso consecutivo de  $i$ , es decir,  $j + 1 = i$ , con  $1 \leq i \leq 3$ ,  $0 \leq j \leq 2$ .

### 7.3. Procesamiento de las medidas

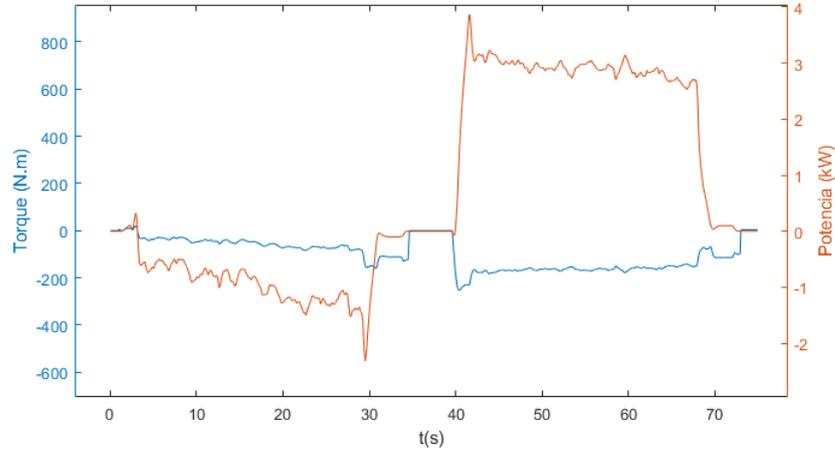


Figura 7.12: Torque y potencia.

Para un edificio de tres pisos más planta baja se define la matriz  $A$  de distancias acumuladas de la siguiente forma:

$$A = \begin{pmatrix} d_{10} & 0 & 0 \\ d_{21} & d_{21} + d_{10} & 0 \\ d_{32} & d_{32} + d_{21} & d_{32} + d_{21} + d_{10} \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

Notar que en la posición de la matriz  $(i, j)$  se encuentra la distancia desde el piso  $i$  al piso  $i - j$  con  $1 \leq i \leq 3$ ,  $1 \leq j \leq 3$  y  $i - j \geq 0$ . Por ello, dada una distancia recorrida por la cabina del ascensor, es posible encontrar de qué piso a qué piso viajó el ascensor. Esto se hace encontrando el par  $(i', j')$  que minimiza el error  $e$  definido por la Ecuación 7.5.

Sea  $d$  una distancia calculada a partir de la curva de velocidad. Se define el error  $e$  como la menor diferencia entre la distancia calculada y las teóricas.

$$e = \text{mín} |A(i, j) - d| \quad (7.5)$$

Si el edificio tiene subsuelos se deben tener en cuentas ciertas consideraciones con la ubicación de los pisos en la matriz. De ser el caso, la matriz  $A$  queda de la siguiente manera.

$$A = \begin{pmatrix} d_{0,-1} & 0 & 0 & 0 \\ d_{10} & d_{10} + d_{0,-1} & 0 & 0 \\ d_{21} & d_{21} + d_{10} & d_{21} + d_{10} + d_{0,-1} & 0 \\ d_{32} & d_{32} + d_{21} & d_{32} + d_{21} + d_{10} & d_{32} + d_{21} + d_{10} + d_{0,-1} \end{pmatrix} \quad (7.6)$$

En este caso en la posición de la matriz  $(i, j)$  se encuentra la distancia desde el piso  $j - 1$  al piso  $j - i - 1$  con  $0 < i < 4$ ,  $0 < j < 4$  y  $j - i - 1 \geq -1$ .

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

Partiendo de la matriz definida, y sabiendo el sentido de giro del motor, es posible determinar los pisos que recorrió el ascensor. En el caso de que la distancia entre los pisos sea la misma, como en el segundo y tercer edificio medido, se aprovechó que la distancia entre planta baja y el primer piso era mayor que en el resto de los pisos, para poder determinar cuando el ascensor iba a planta baja. En caso contrario, se minimizó el error para la totalidad de los pisos recorridos.

A continuación se muestra el código de Matlab realizado para construir la matriz de distancias acumuladas.

```
aux = D;
distAcumulada = D;
A = [];
for j = 1:length(D)
    A = [A distAcumulada];
    aux = [zeros(1,1); aux(1:end-1)];
    distAcumulada = distAcumulada+aux;
end

% Impongo los 0 de la matriz
for i=1:length(A(1,:))
    j = i + 1;
    while j <= length(A(:,1))
        A(i,j) = 0;
        j = j + 1;
    end
end
```

### 7.3.6. Variación del torque a lo largo de un viaje

En la Sección 7.3.3 se analizó cómo es la curva del torque en función del tiempo a lo largo de un viaje. Se vio que el torque varía, hecho que es explicado parcialmente por la cuerda.

En la Figura 7.13 se muestra el valor absoluto de la velocidad y la curva de torque de referencia. Observar que en la curva de velocidad hay cuatro puntos marcados. Los rojos indican el principio y el fin del viaje, mientras que los de color magenta señalan el comienzo y el fin de la velocidad constante. El código de Matlab identifica estos puntos y calcula la recta que mejor aproxima al torque de referencia cuando la velocidad es constante. En la figura mencionada se pueden ver dichas rectas, y además se indica con un círculo el punto en donde se calcula la carga del ascensor, tema tratado en la Sección 7.3.8.

La pendiente de la recta que mejor aproxima al torque de referencia en la zona de velocidad constante cuando la cabina sube es distinta a la que ocurre cuando baja. La diferencia se debe a una asimetría en el sistema mecánico. A modo de

### 7.3. Procesamiento de las medidas

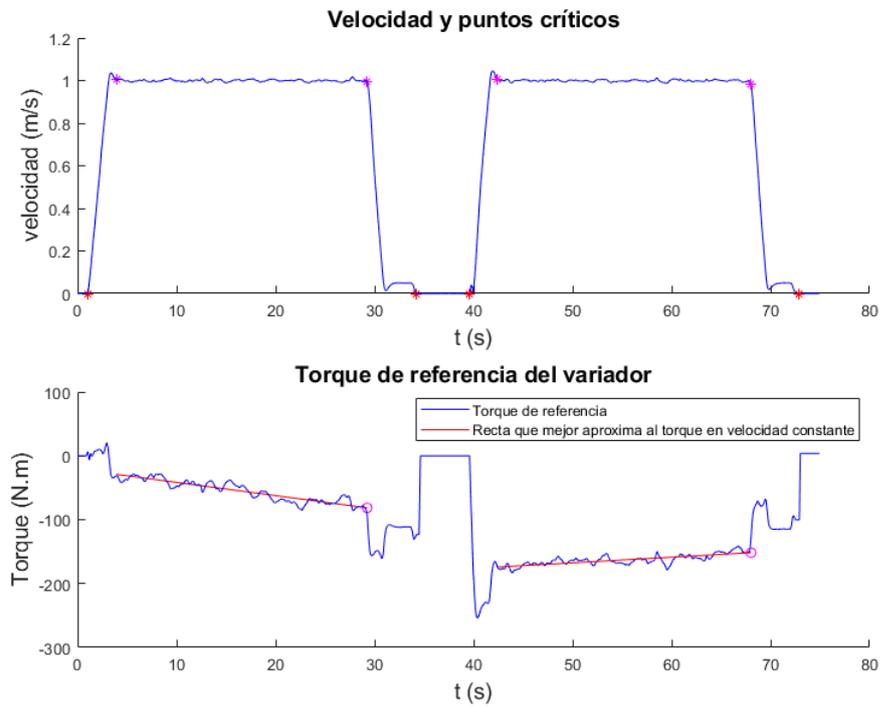


Figura 7.13: Velocidad y torque de la cabina en pisos consecutivos para el tercer edificio medido.

ejemplo, en la Figura 7.14, se muestra el torque de varios viajes con las rectas mencionadas del primer edificio medido.

En la figura mencionada se puede apreciar que la pendiente negativa es mayor, en valor absoluto, que la pendiente positiva. De todas formas, en los viajes mostrados coincide que cuando la cabina sube, el motor regenera energía y cuando baja consume, por lo que se podría generar alguna duda si la pendiente cambia cuando la cabina sube o baja, o cuando el motor genera o consume potencia. Debido a esto en la Figura 7.15 se muestran varios viajes más, donde en el tercer y cuarto viaje el motor consume potencia, pero en el tercero la cabina baja y en el cuarto sube. Se nota de forma clara que en estos viajes las pendientes son distintas.

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

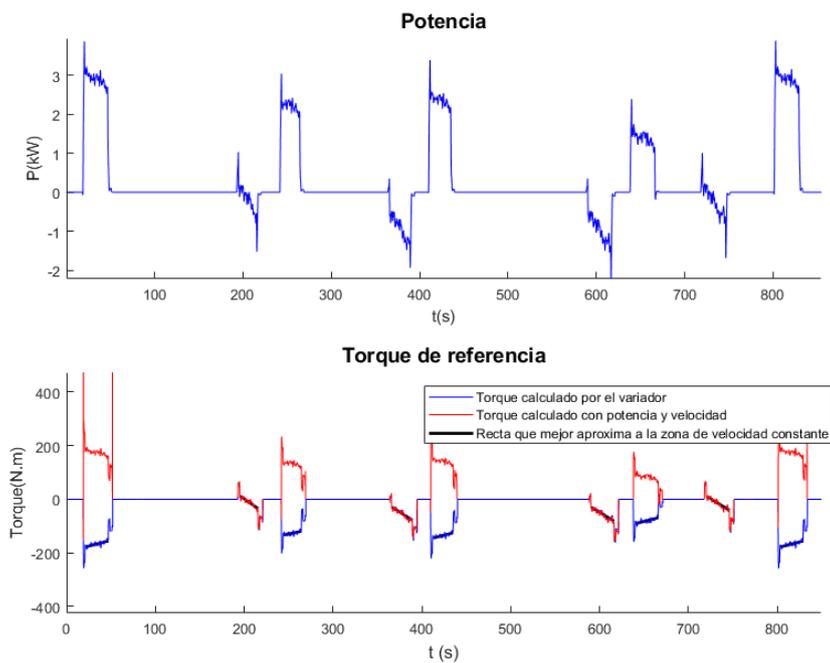


Figura 7.14: Potencia y torque en varios viajes del primer edificio medido.

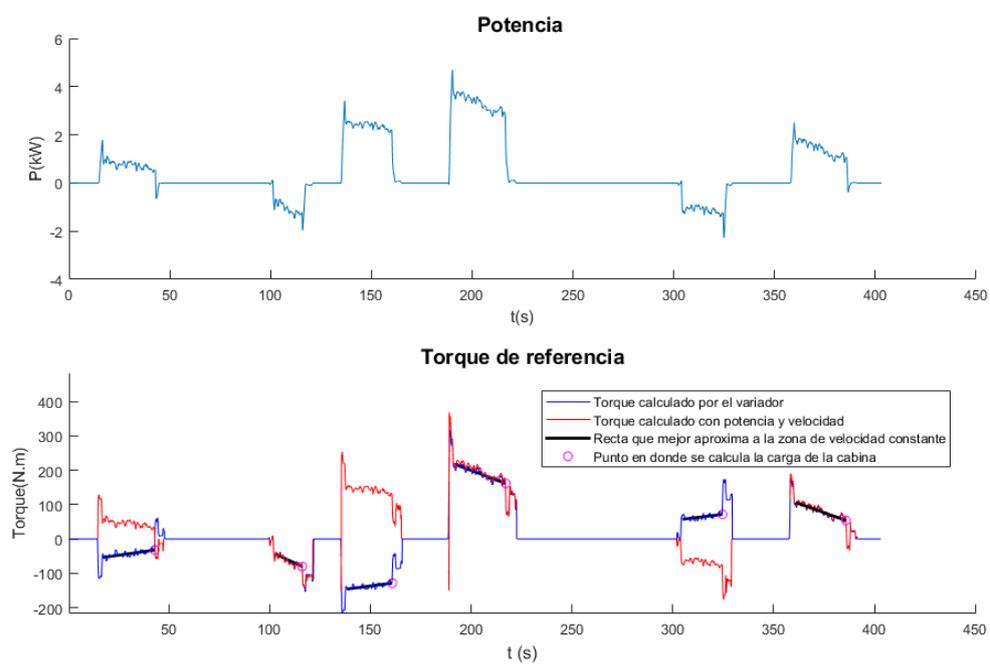


Figura 7.15: Potencia y torque en varios viajes del primer edificio medido.

Es posible concluir que la diferencia en las pendientes ocurre por una asimetría en la fricción del sistema mecánico que depende del sentido de giro del motor. Este

### 7.3. Procesamiento de las medidas

fenómeno ocurrió en los tres edificios medidos.

Se tomaron diez viajes distintos para el caso en el que motor regenera potencia y diez más en el que consume. En la siguiente tabla se muestran los valores promedios que se obtuvieron para cada edificio.

Edificio	Pendiente del torque	
	Cabina subiendo (N.m/s)	Cabina bajando (N.m/s)
Edificio #1	0,83	-2,16
Edificio #2	1,48	-1,87
Edificio #3	3,40	-3,90

Tabla 7.4: Pendientes promedios por edificio.

El valor de la pendiente muestra la variación del torque en el tiempo, es decir, si la pendiente del torque en valor absoluto es mayor, el torque tiene una mayor variación en el tiempo. En el Edificio #3 (segundo edificio residencial), la pendiente es mucho mayor que en el resto debido a que la velocidad del motor es 1,5 veces superior que en los otros dos, por lo que significa que la cuerda se mueve más rápido, generando una mayor variación del torque.

#### 7.3.7. Cálculo de las pérdidas del sistema

La diferencia entre la potencia consumida y la generada por el motor se origina por pérdidas de fricción en el sistema mecánico del ascensor. Si bien las pérdidas no son medibles, sí se pueden estimar mediante ensayos cuando la velocidad del motor es constante.

Sean  $P_1$  y  $P_2$  la potencia medida en el variador en el caso en el que el motor consume ( $P_1 > 0$ ) y genera ( $P_2 < 0$ ) potencia respectivamente, para una misma carga y viajes opuestos<sup>2</sup>. Además, consideremos  $P_p$  como las pérdidas del motor y del sistema mecánico,  $P_r$  la potencia generada por el motor ( $P_r < 0$ ) y  $P_c$  la potencia consumida por él ( $P_c > 0$ ).

Se vincula la potencia generada del motor con la potencia consumida por el mismo mediante la ecuación 7.7. Se toma como hipótesis que el rendimiento del motor no varía si opera como motor o como generador, entonces se cumple que  $|P_r| = |P_c|$  para viajes opuestos con la misma carga. Bajo estos supuestos, el motor opera como un convertidor ideal ( $\eta = 1$ ).

A partir de las magnitudes definidas se deducen las siguientes igualdades:

$$\begin{cases} P_1 = P_p + P_c \\ P_2 = P_p + P_r \\ -P_r = P_c \end{cases} \Rightarrow P_p = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (7.7)$$

<sup>2</sup>Si se realiza un viaje del piso  $i$  al piso  $j$ , el viaje opuesto es del piso  $j$  al piso  $i$ .

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

A lo largo de un viaje, se produce un desbalance entre un lado y el otro de la polea, provocado por la variación de la cuerda en movimiento. Sin embargo, la acumulación de mayores tramos de cuerda del lado de la cabina o del contrapeso no está relacionado con las pérdidas, y es por ello que, para independizarse de este efecto, se invierte una de las potencias en el tiempo<sup>3</sup>. De esta manera, se logra comparar los viajes cuando el ascensor sube y cuando baja al mismo piso, con el mismo tramo de cuerda del lado del contrapeso y del lado de la cabina en ambos casos.

Este artilugio permite que la cabina se encuentre a la misma altura a lo largo del tiempo en los dos viajes opuestos. Vale resaltar que la inversión es válida cuando la velocidad es constante, debido a que la aceleración del motor es distinta a la desaceleración. Es por tal motivo que se invierte y se hace coincidir el comienzo de la zona de velocidad constante de una potencia con el fin de la velocidad constante de la potencia del viaje opuesto (al invertir una potencia, el fin de la velocidad constante ocurre primero que el comienzo).

En esta ocasión se mostrarán las gráficas de las pérdidas del tercer edificio medido. Se optó por este edificio porque tiene un desbalance pequeño causado por la asimetría en el sistema mecánico, y por tanto las pérdidas tendrán una menor variación.

En las Figuras 7.16 y 7.17 se muestran las pérdidas del Edificio #3 (segundo edificio residencial) en los viajes de 5 a 0 y 11 a 5 respectivamente, con una carga de 150 kg en ambos viajes. Además, se presenta en color azul la curva de potencia del viaje en que la cabina baja de 5 a 0, en rojo la curva del viaje opuesto y en color naranja la curva inversa del último viaje mencionado.

Además es interesante poder estudiar si la carga del ascensor produce un cambio en las pérdidas. Es por esto que en la Figura 7.18 se exhiben las mismas curvas pero en el viaje desde el piso 11 al -1 vacío. Notar que cuando la cabina está vacía el desbalance a ambos lados de la polea es máximo.

Para cada viaje se calcula el promedio de las pérdidas en el tiempo en el cual la velocidad se mantiene constante. El resultado se muestra en la Tabla 7.5.

Viaje	Carga de la cabina (kg)	Pérdidas (kW)
5 → 11	150	0,92
0 → 5	150	0,88
-1 → 11	0	0,88

Tabla 7.5: Potencia de pérdidas promedio para los viajes estudiados.

---

<sup>3</sup>*Invertir* la potencia se refiere a invertir en el tiempo todos los elementos del vector discreto de potencia.

### 7.3. Procesamiento de las medidas

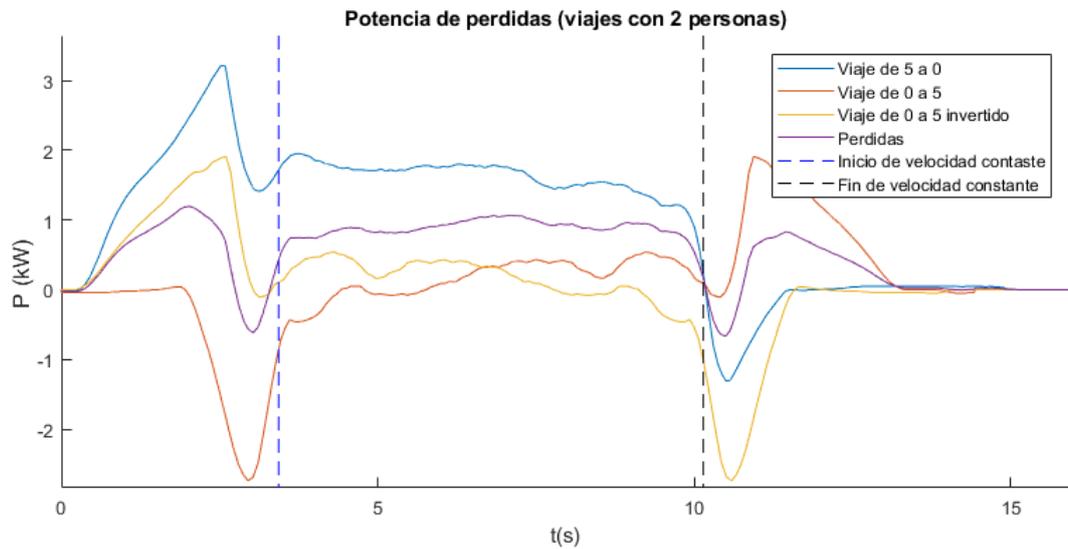


Figura 7.16: Edificio #3: Pérdidas en un viaje del piso 5 al 0 con 2 personas.

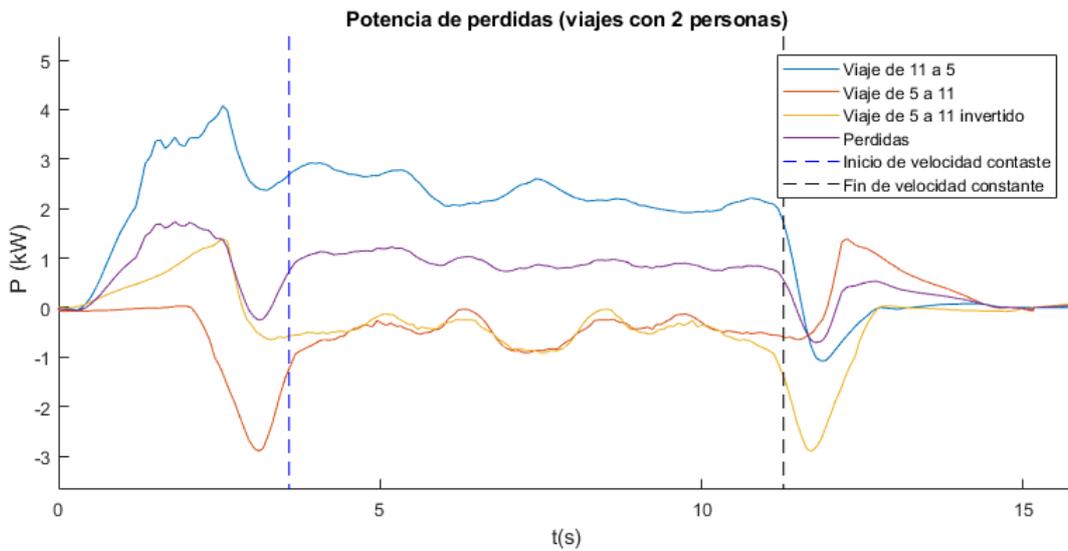


Figura 7.17: Ejercicio #3: Pérdidas en un viaje desde el piso 11 al 5 con 2 personas.

Como se preveía, el valor de las pérdidas no cambió con la carga del ascensor ni con los viajes recorridos. Por otro lado, se puede apreciar que hay una variación a lo largo de los viajes, la cual es explicada únicamente por asimetrías del sistema mecánico. Para poder visualizar mejor la variación, se muestra solamente la gráfica de potencia de pérdidas en el viaje desde el piso -1 al 11 con la recta que mejor la aproxima cuando la velocidad es constante.

A partir de la Ecuación 7.2, la cual vincula la potencia con el torque, se calcula el torque equivalente a las pérdidas calculadas. Es decir, se debe dividir a la curva mostrada en la Figura 7.19 entre la velocidad, la cual se mantiene constante en la

Capítulo 7. Campaña de mediciones

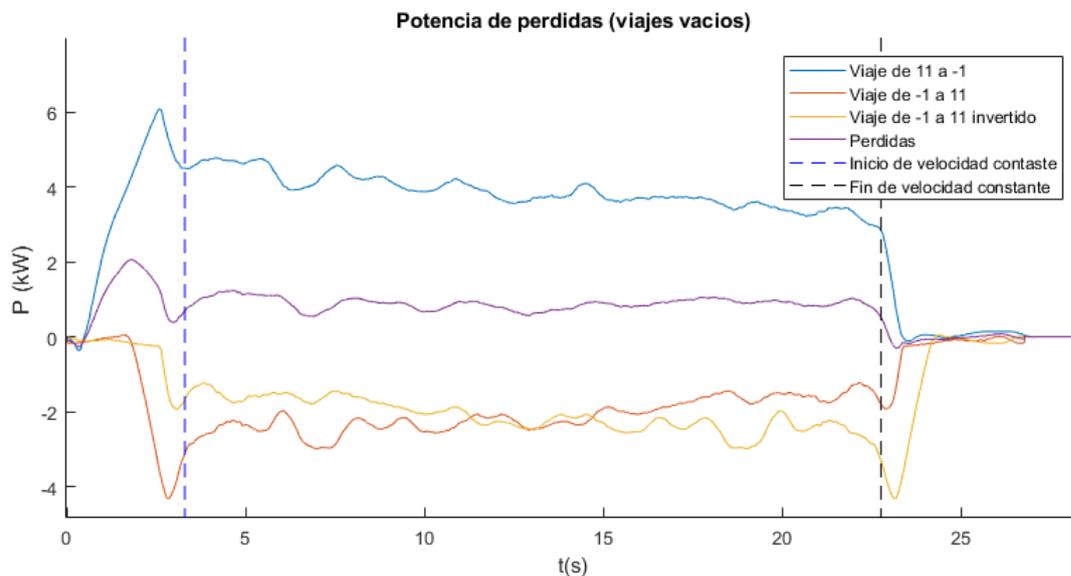


Figura 7.18: Edificio #3: Pérdidas en un viaje desde el piso 11 al -1 con la cabina vacía.

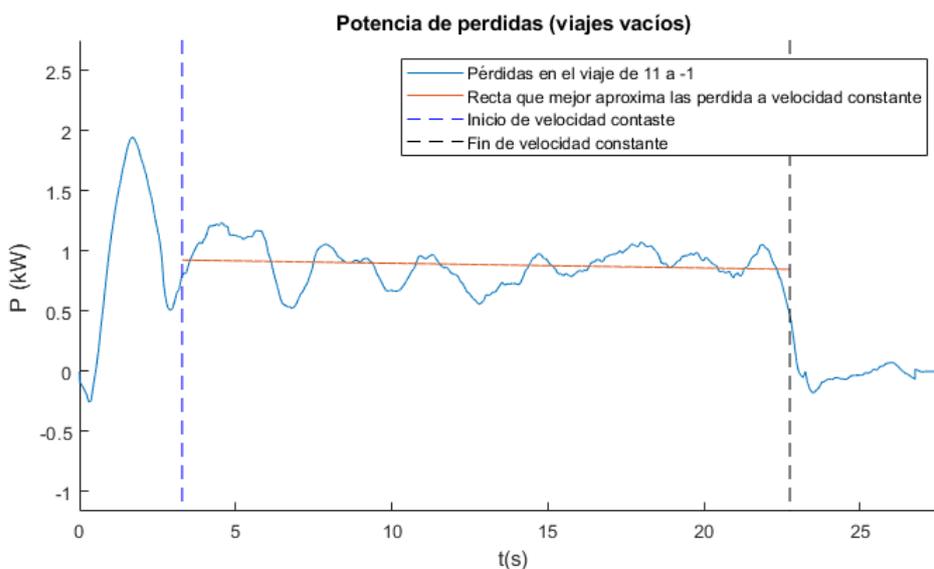


Figura 7.19: Edificio #3: Pérdidas en un viaje desde el piso 11 al -1 con la cabina vacía.

zona donde es válido el cálculo de las pérdidas. El torque equivalente es:

$$\tau_p = \frac{P_p}{w} = P_p \frac{60}{2\pi n} = 36 \text{ Nm} \quad (7.8)$$

En los Edificios #1 y #2 las pérdidas tienen una mayor variación que en el tercero. En la Figura 7.20 se muestra el torque equivalente a las pérdidas calculadas en el viaje de 0 a 7 vacío del primer edificio medido y en la Figura 7.21 el del segundo edificio medido en el viaje de 0 a 11 vacío.

### 7.3. Procesamiento de las medidas

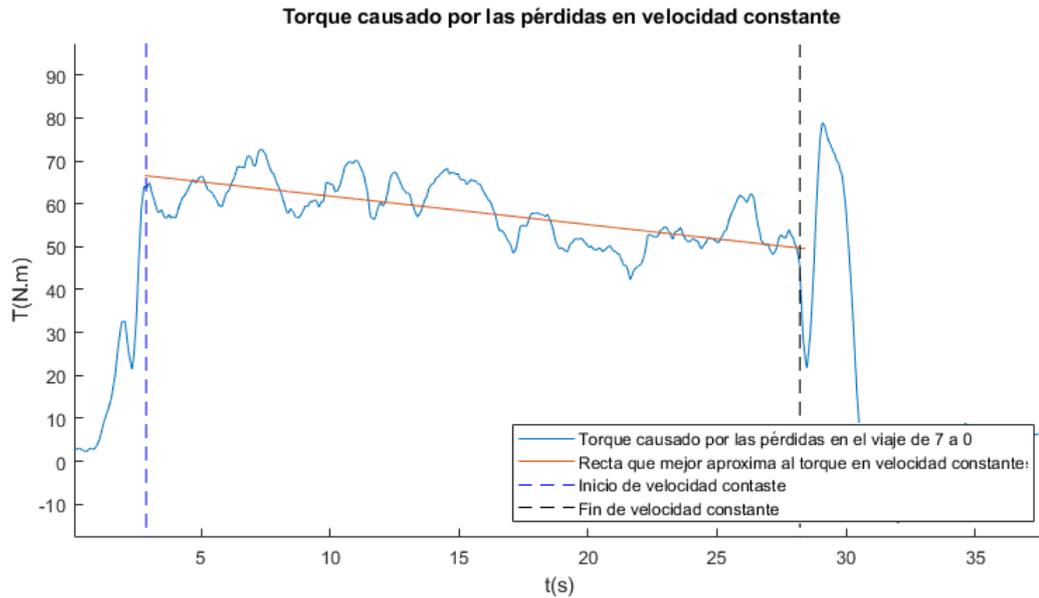


Figura 7.20: Torque equivalente a las pérdidas calculadas en el primer edificio medido.

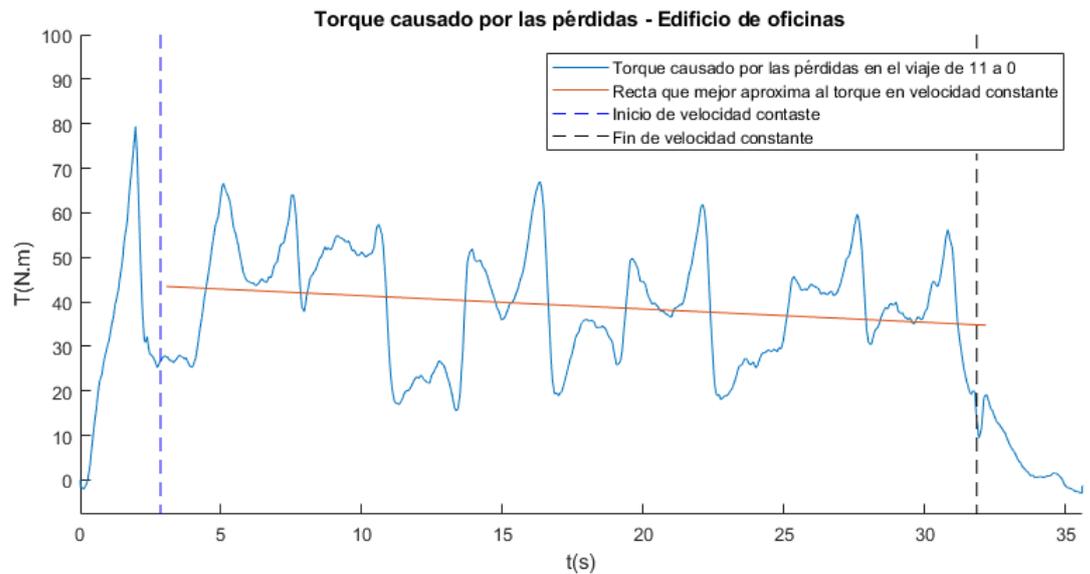


Figura 7.21: Torque equivalente a las pérdidas calculadas en el segundo edificio medido.

En la Tabla 7.6 se muestran las pérdidas calculadas para cada edificio, el torque equivalente a esas pérdidas, la potencia promedio del viaje con mayor desbalance cabina-contrapeso (viaje vacío) y el peso de las pérdidas en la potencia media.

Las pérdidas varían según el edificio, entre el Edificio #1 y #3 hay una diferencia de 70 W, pero con el Edificio #2 270 W (con respecto al #1). Esta diferencia ocurre por el peso de la cabina y del contrapeso. A lo largo de un viaje existen

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

Edificio	$P_p$ (kW)	$T_p$ (Nm)	$\bar{P}$ (kW)	% pérdidas
Edificio #1	0.97	58.06	2.91	33
Edificio #2	0.70	42.04	1.93	36
Edificio #3	0.90	36.03	3.86	23

Tabla 7.6: Pérdidas promedio de los edificios medidos.

pequeños movimientos horizontales, controlados por el sistema de guiado. Estas pérdidas son causadas en gran medida por este movimiento, por lo que si el contrapeso y la cabina tienen una gran masa, las pérdidas serán mayores. En la Tabla 7.7 se comparan las masas mencionadas.

Edificio	M cabina (kg)	M contrapeso (kg)	Diferencia (kg)
Edificio #1	700	1000	300
Edificio #2	450	650	200
Edificio #3	650	950	300

Tabla 7.7: Comparación entre la masa de la cabina y del contrapeso de cada edificio.

Notar que cuanto mayor es el peso de la cabina y el contrapeso, las pérdidas son mayores. La masa de estos elementos en el segundo edificio es mucho menor que en los otros dos, por lo que explica la gran diferencia en las pérdidas con respecto a los otros dos edificios medidos.

Regresando a la Tabla 7.6,  $\bar{P}$  es la potencia media máxima que existe en un viaje, el cual ocurre cuando la cabina no cuenta con ningún pasajero. La potencia en el Edificio #2 es la menor dado que el desbalance entre la cabina y el contrapeso es de 100 kg menos, por lo que el motor cuenta con menor carga.

Sin embargo, en los Edificios #1 y #3 el desbalance entre las masas no explica la gran diferencia que hay entre las potencias consumidas. Esto se debe a que en el tercer edificio la velocidad es 1.5 veces superior que en el primer edificio, lo que implica que a una igual carga, la potencia consumida será mayor, dado que la velocidad es mayor (ver Ecuación 7.2).

Las pérdidas en el sistema en los primeros dos edificios medidos superan el 30% de la energía consumida/generada por el motor en el mejor de los casos, ya que este porcentaje se obtuvo cuando el motor consume mayor potencia. Como se demostró, las pérdidas no varían con la carga, por lo que si el desbalance entre el contrapeso y la cabina es menor, la potencia consumida decrece, pero las pérdidas seguirán siendo las mismas, ocupando un porcentaje mayor de la potencia consumida por el motor. Por otro lado, si la potencia consumida por el motor aumenta, por ejemplo si la velocidad aumenta, el porcentaje de la potencia ocupada por las pérdidas disminuye, lo que no quiere decir que hayan menos pérdidas.

Sin duda que las pérdidas juegan un rol preponderante para que la regeneración de energía en ascensores sea viable, por eso la necesidad de demostrar que

efectivamente la potencia medida es la real, implementando un circuito para la medida.

### 7.3.8. Determinación de la carga del ascensor

A partir del torque de referencia, se pudo determinar la cantidad de personas que lleva el ascensor en cada viaje. Para ello se utilizó el tramo de torque cuando la velocidad es constante. La expresión del torque se deduce a partir de la Ecuación 4.23.

$$\tau = -(g\lambda) \cdot r^2\theta + g \left( \frac{M - M_c}{2} + \lambda k \right) r \quad (7.9)$$

Se debe tener en cuenta que en la Ecuación 7.9 no se consideran las pérdidas en el sistema, las cuales no se pueden despreciar (ver Sección 7.3.7). Se considera entonces la Ecuación 7.10, la cual permite calcular la carga de la cabina en un momento del viaje.

$$\tau = g \left( \frac{M + m_p + m_v - M_c}{2} \right) r + \tau_p + \tau_{ajuste} \quad (7.10)$$

Sea  $m_p$  la masa del total de las personas que tiene la cabina durante el viaje, y  $m_v$  una masa que modela el desbalance producido por el peso de la cuerda en conjunto con la asimetría en el rozamiento que ocurre cuando el ascensor sube o baja. Sea  $M$  la masa de la cabina y  $M_c$  la del contrapeso. También se define  $\tau_p$  y  $P_p$  como el torque y la potencia disipada por las pérdidas del sistema, las cuales se vinculan, de acuerdo a la Ecuación 7.2, de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \tau_p = \frac{P_p}{\omega} & \text{si } P \geq 0 \\ \tau_p = -\frac{P_p}{\omega} & \text{si } P < 0 \end{cases} \quad (7.11)$$

Una vez determinadas las pérdidas del sistema, es posible calcular el torque que produce la carga, la cabina y el contrapeso. En la Figura 7.22 se muestra el torque considerando las pérdidas y sin considerarlas en el Edificio #3.

Como fue mostrado en la Tabla 7.6, las pérdidas en el Edificio #3 equivalen a un torque de 36,03 Nm. En la Figura 7.24 se muestra el torque corregido con las rectas halladas por mínimos cuadrados en la zona de velocidad constante.

Si se supone que la cuerda no tiene incidencia en el torque, con los parámetros del Edificio #3 se obtiene un torque teórico igual a  $\tau_{teo} = 176,4$  Nm cuando la cabina está vacía. En el viaje que va desde el piso -1 al 11 mostrado en la Figura 7.22, el torque varía entre 107,2 Nm a 205,3 Nm, por lo que el valor teórico está comprendido dentro del rango de variación real.

El otro factor en cuestión,  $m_v$ , se modela como una masa que se suma o resta al peso de la cabina (restarle peso a la cabina equivale a sumarle masa al contrapeso). Como se vio en las secciones previas, el origen de este factor está dado por la

Capítulo 7. Campaña de mediciones

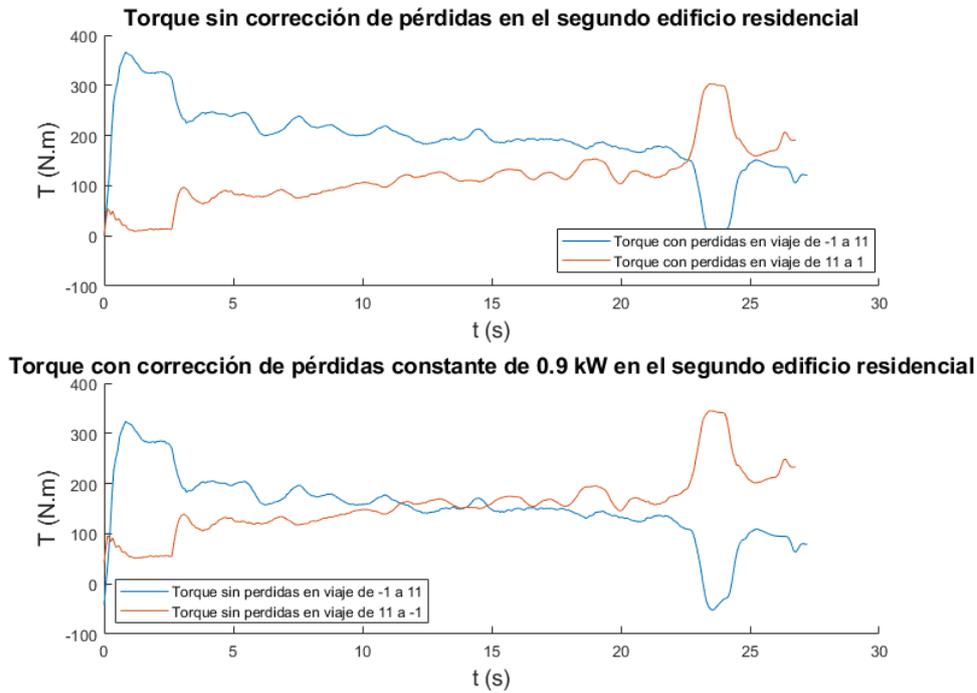


Figura 7.22: Torque considerando las pérdidas vs. torque sin considerar pérdidas.

variación de la posición del cable a lo largo del viaje, y por una asimetría en el sistema mecánico que origina que las pérdidas sean distintas cuando el ascensor sube o baja.

Sean  $y$  e  $y_2$  definidas como indica la Figura 7.23,  $L$  el largo total de la cuerda y  $r$  el radio de la polea. Se cumple que:

$$L = y + \pi r + y_2 \Rightarrow y_2 = L - y - \pi r \quad (7.12)$$

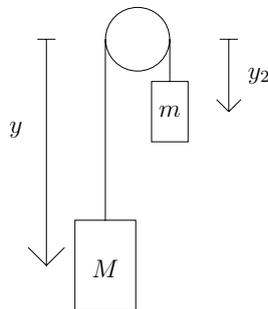


Figura 7.23: Modelo mecánico del ascensor.

Considerando el tramo de cuerda del lado de la cabina y del contrapeso, se calcula una distancia equivalente  $d_{eq}$  de la siguiente manera:

### 7.3. Procesamiento de las medidas

$$d_{eq} = y - y_2 = y - L + y + \pi r = 2y - L + \pi r \quad (7.13)$$

Entonces, ese trozo de cuerda tiene una masa  $m_{cuerda}$ , la cual queda definida a partir de la siguiente ecuación, donde  $\lambda_{eq}$  es la masa de la cuerda equivalente por unidad de longitud:

$$m_{cuerda} = \lambda_{eq} d_{eq} = \lambda_{eq}(2y - L + \pi r) \quad (7.14)$$

Para obtener  $m_v$  se debe multiplicar  $m_{cuerda}$  por un factor ( $f_a$ ) que produzca la asimetría que existe en las medidas al subir o bajar. En la Figura 7.24 se muestra el torque para viajes opuestos con las curvas que mejor lo aproximan a velocidad constante. Los viajes son opuestos, por lo que las rectas se deberían intersectar en la mitad del viaje si dependiera solamente de la cuerda. Sin embargo, el factor de asimetría es el que produce que éstas se intersecten antes.

**Torque con corrección de pérdidas constante de 0.9 kW en el segundo edificio residencial**

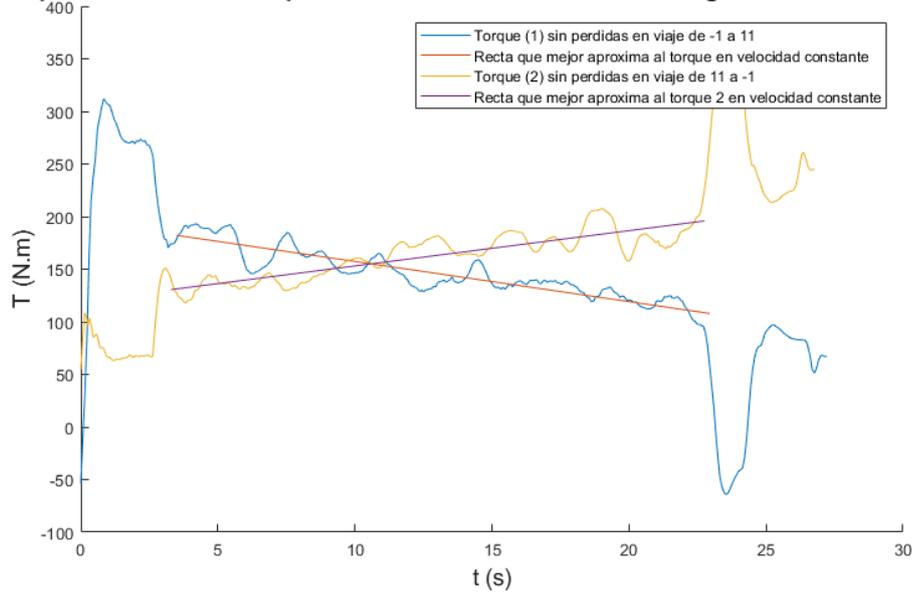


Figura 7.24: Torque considerando las pérdidas.

A partir de las medidas no se pudo obtener el factor de asimetría, pero sí se puede calcular  $\lambda \cdot f_a$  planteando un sistema de ecuaciones en caso de que la cabina suba y otro cuando baja.

A partir de esto, se ajustaron los parámetros con varios casos conocidos de forma tal de que la masa calculada sea la real, mediante el factor  $\tau_{ajuste}$ . Dicho parámetro de ajuste se origina porque la masa de la cabina y del contrapeso no es exactamente lo que el plano técnico expresa, sino que tiene pequeñas variaciones. Además, existen tramos de cuerda que siempre permanecen del mismo lado de la polea, por lo que se modela que dichos tramos pertenecen a la cabina o al contrapeso.

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

En la Figura 7.25 se muestra un viaje del piso más alto del edificio al piso más bajo, sin carga en la cabina. Además, se muestran algunos puntos críticos a utilizar en el sistema de ecuaciones.

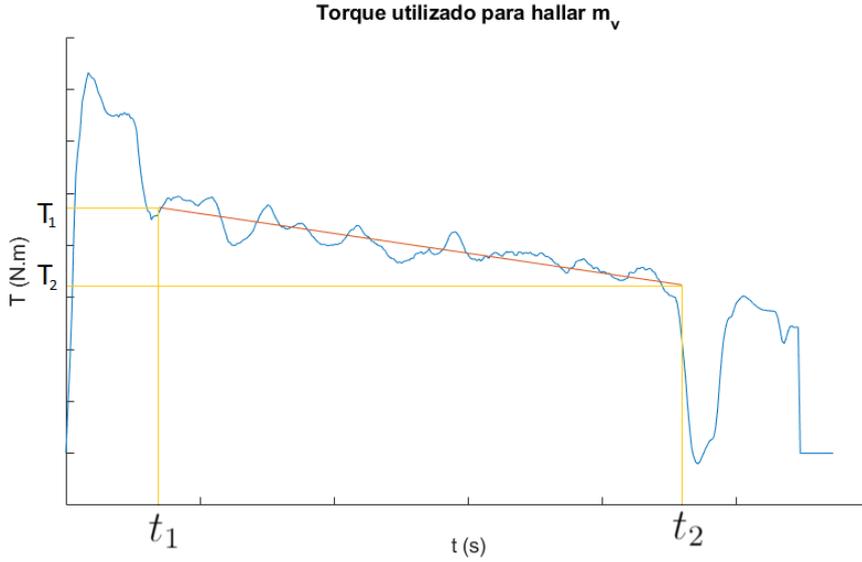


Figura 7.25: Torque con puntos críticos para un viaje del piso más alto al más bajo vacío.

El sistema de ecuaciones para el caso en el que la cabina baja, en las condiciones ya descritas, es el siguiente:

$$\begin{cases} T_1 = g\left(\frac{M-M_c-m_v^*}{2}\right)r + \tau_p + \tau_{ajuste} \\ T_2 = g\left(\frac{M-M_c+m_v^*}{2}\right)r + \tau_p + \tau_{ajuste} \end{cases} \quad (7.15)$$

La distancia recorrida en el tramo considerado es conocida, ya que es la integral de la curva de velocidad, por lo que es posible hallar el producto de los factores  $\lambda \cdot f_a$ . Vale resaltar que estos factores representan la variación de torque modelado como una masa por unidad de longitud.

Considerando los puntos de la misma forma, para el caso en que el ascensor sube, el sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\begin{cases} T_1 = g\left(\frac{M-M_c+m_v^{**}}{2}\right)r + \tau_p + \tau_{ajuste} \\ T_2 = g\left(\frac{M-M_c-m_v^{**}}{2}\right)r + \tau_p + \tau_{ajuste} \end{cases} \quad (7.16)$$

Se debe aclarar que en este caso  $T_1$  se determina cuando el ascensor se encuentra en el piso más bajo del edificio, mientras que para  $T_2$  el ascensor está en el punto más alto. Los parámetros para cada edificio se muestran en la Tabla 7.8.

### 7.3. Procesamiento de las medidas

Edificio	M cabina (kg)	M contrapeso (kg)	$\lambda \cdot f_a$ (sube)	$\lambda \cdot f_a$ (baja)	$\tau_p$ (Nm)	$\tau_a$ (Nm)
Edificio #1	700	1000	1.25	1.85	58.06	0.5
Edificio #2	450	650	1.45	1.65	42.04	1.2
Edificio #3	650	950	2.17	2.26	36.0	4.3

Tabla 7.8: Parámetros de cada edificio utilizados para el cálculo de la carga de la cabina.

#### 7.3.9. Estimación del peso por persona

Al momento de determinar la carga de los viajes, se tuvo que estimar el peso aproximado de las personas, debido a que con el método explicado se halla la masa que tiene la cabina. Es por esto que se debe asignar un peso promedio a cada persona.

Para cumplir el objetivo antes mencionado, se hizo uso del *Índice de Masa Corporal*. Este es un indicador que se calcula en base al peso y estatura de la persona. En Uruguay, el IMC se distribuye como en la Tabla 7.9.

Índice de Masa Corporal - IMC Uruguay			
Normal (< 25)	Sobrepeso (25-29,9)	Obesidad (30-34,9)	Alto riesgo ( $\geq 35$ )
46 %	34 %	14 %	6 %

Tabla 7.9: Proporción del IMC en Uruguay.

Considerando que los uruguayos tienen una estatura promedio de 1,68 m, se puede determinar un peso promedio haciendo uso de la Ecuación 7.17, ecuación que determina el IMC.

$$IMC = \frac{Peso [kg]}{Altura^2 [m^2]} \quad (7.17)$$

Luego, el peso promedio queda determinado como:

$$\bar{P} = (1,68)^2 \times (0,46 \cdot 20 + 0,34 \cdot 27,5 + 0,14 \cdot 33,5 + 0,06 \cdot 40) = 72,4 \text{ kg}$$

En secciones posteriores se presentará una encuesta que se realizó a un grupo representativo para determinar las condiciones de uso promedio del ascensor. En ella, se presentó la pregunta *Señale su peso promedio*. Los resultados arrojados fueron los siguientes:

Encuesta - Peso promedio			
< 60 kg	60 – 79 kg	80 – 99 kg	$\geq 100$
21,5 %	54,9 %	20,5 %	3,1 %

Tabla 7.10: Encuesta - peso promedio.

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

De los datos anteriores se puede estimar el peso promedio de igual manera que con el IMC:

$$\bar{P} = 0,215 \cdot 50 + 0,549 \cdot 70 + 0,205 \cdot 90 + 0,031 \cdot 110 = 67,7 \text{ kg}$$

Este resultado fortalece el antes mencionado. Se concluye entonces un peso promedio de 70 kilogramos.

### 7.4. Reporte de las medidas

Se analizaron y clasificaron los archivos obtenidos del variador con la ayuda de los programas **AnalizarMedidas** y **AnalisisDeVariosDatosExtraidos**, los cuales toman los archivos en formato .csv del variador, y los resumen en un único archivo.xlsx. Esto facilitó y aceleró el proceso de análisis de las medidas, permitiendo realizar el proceso de clasificación repetidas veces de forma iterativa. Como ejemplo, se tomaron las medidas correspondientes a un mes, y se analizaron resultados energéticos y de uso.

Posterior a esto, se clasificaron las medidas según el día de la semana, para agruparlas en días hábiles y fin de semana. También así se logró obtener una curva aproximada del uso del ascensor según franjas horarias.

Para poder entender mejor los programas construidos y los archivos que exporta cada programa, en las Figuras 7.26 y 7.27 se muestran un diagrama de flujo del procesamiento diario y mensual de las medidas respectivamente.



Figura 7.26: Diagrama de flujo del procesamiento diario de las medidas.

Este procedimiento se realizó por completo para los meses de febrero y marzo, meses en los que se logró contar con casi la totalidad de las medidas. Para los restantes meses, los análisis no pudieron ser más profundos por falta de medidas.

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

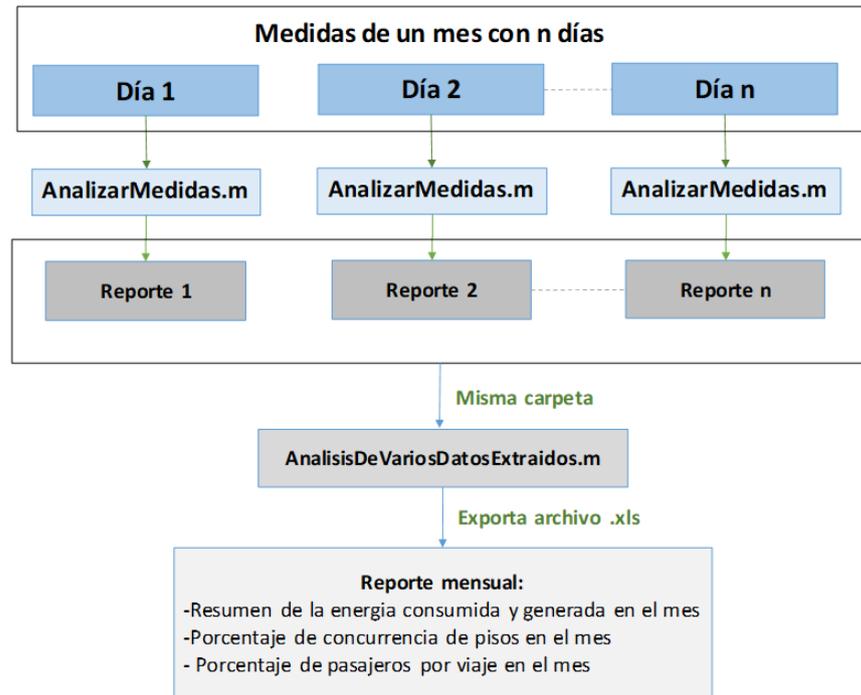


Figura 7.27: Diagrama de flujo del procesamiento mensual de las medidas.

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

La necesidad de realizar la medida de potencia surge porque, a priori, no se conoce de qué forma el variador realiza esta medida, y las pérdidas en el sistema son muy elevadas. En un principio, se desconoce el motivo de las pérdidas elevadas y se tiene la incertidumbre de si las medidas adquiridas corresponden a la potencia real del sistema. Esta medida es fundamental para poder asegurar que son correctas las conclusiones que se harán en cuanto a la viabilidad de los dispositivos regenerativos en ascensores.

La medida de potencia se realizó adquiriendo la onda de voltaje y corriente de entrada del motor en un osciloscopio a lo largo de varios viajes. En la Figura 7.28 se muestra un esquema del circuito de potencia del motor.

Como se puede apreciar en la figura anterior, el variador de frecuencia alimenta un motor síncrono que cuenta con las siguientes características

- $U_n = 380 \text{ V}$
- $P_n = 5,2 \text{ kW}$
- $I_n = 13,5 \text{ A}$
- $f_n = 40 \text{ Hz}$

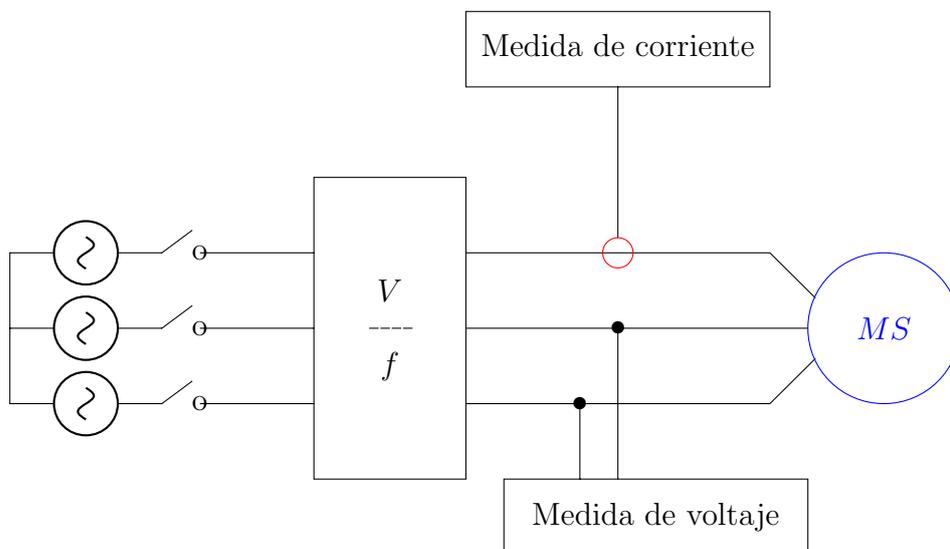


Figura 7.28: Circuito de potencia a medir.

- $n_n = 240$  rpm
- $T_n = 310$  Nm

La dificultad de este trabajo surge debido a que la mayoría de los instrumentos de medidas están diseñados para medir sus magnitudes entorno a la frecuencia de la red, y en este caso se quiere medir a una frecuencia menor, 40 Hz.

Además, el voltaje a la salida del variador contiene armónicos que no aportan en la generación de potencia, por lo que éstos se tendrán que filtrar. En la medida de corriente no se tendrá este problema, ya que la inductancia del motor se encarga de eliminar los armónicos.

Las magnitudes se medirán con un osciloscopio, por lo que se deberán adecuar las señales mediante ciertos circuitos para que este instrumento pueda medirlas.

### 7.5.1. Medida de Voltaje

La medida de voltaje se realizó con un transformador de relación de transformación 220/42 V/V, un divisor de voltaje, y un filtro pasa bajos. Se utiliza un filtro dado que el voltaje que se le suministra al motor es en forma de pulsos (control PWM), por lo cual no es posible realizar medidas en forma directa. Este filtro permite únicamente el paso de la componente fundamental y los primeros armónicos de la señal. Se necesitó del divisor de voltaje para poder bajar el voltaje de línea a valores admisibles para el transformador, de forma tal de no dañar su aislación ni saturar su núcleo.

Se conectó un canal del osciloscopio a la salida del filtro para medir la señal resultante y poder registrarla. Por lo tanto, el orden de los componentes es: divisor

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

de voltaje, transformador, filtro y canal de osciloscopio respectivamente, como se muestra en la Figura 7.29.

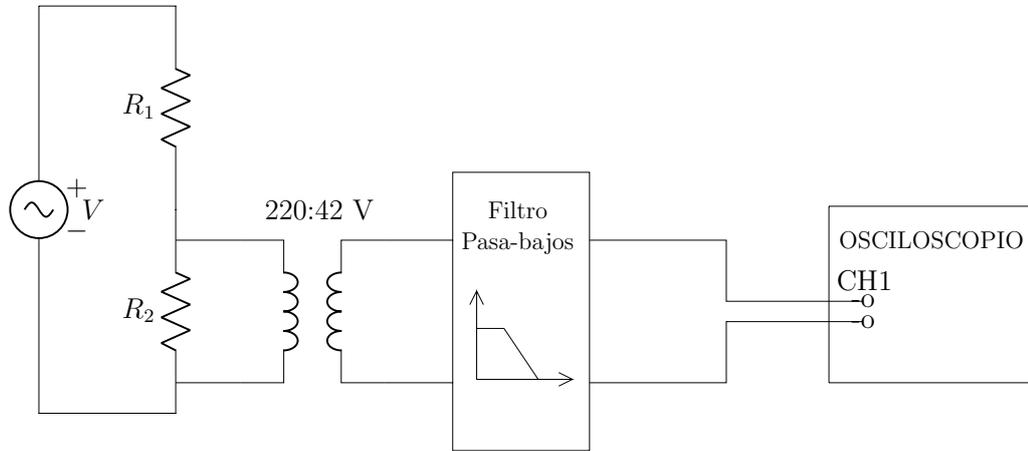


Figura 7.29: Circuito para realizar la medida del voltaje.

### Transformador de voltaje

El transformador de voltaje utilizado es de 220/42-21-11 V/V. Se relevó la curva de saturación a una frecuencia de 50 Hz de forma tal de poder garantizar que se va a trabajar en la zona lineal. En la Figura 7.30 se muestran los datos relevados y la curva que mejor aproxima la zona lineal.

En la figura antes mencionada, se puede apreciar que hasta el cuarto dato relevado el transformador se encuentra dentro de su zona lineal, este se da a un voltaje de 105 V, por lo que se tendrá que trabajar en un rango de voltaje de 0 a 105 V.

No se puede perder de vista que la frecuencia nominal del motor es de 40 Hz. Recordando la ley de Faraday ( $V=N\frac{d\Phi}{dt}$ ), y tomando la hipótesis de que se trabajará con voltajes sinusoidales, se puede llegar a la relación que el flujo es proporcional al cociente entre el voltaje y la frecuencia.

Para que el transformador no sature, el flujo se debe mantener constante, por lo que el cociente entre el voltaje y la frecuencia debe permanecer constante.

$$\frac{V}{f} = \frac{V_{50}}{50 \text{ Hz}} = \frac{V^*}{f^*} = cte \Rightarrow V^* = f^* \frac{V_{50}}{50 \text{ Hz}} \quad (7.18)$$

Se procede a escalar la curva hallada a la frecuencia nominal del motor. En la Figura 7.31 se muestra la curva relevada y la escalada.

Para garantizar la zona lineal a 40 Hz, no se debe superar un voltaje de 75 V. Además, se corroboró su relación de transformación. El resultado considerando como  $n_i$  el número de vueltas del bobinado  $i$  es el siguiente:

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

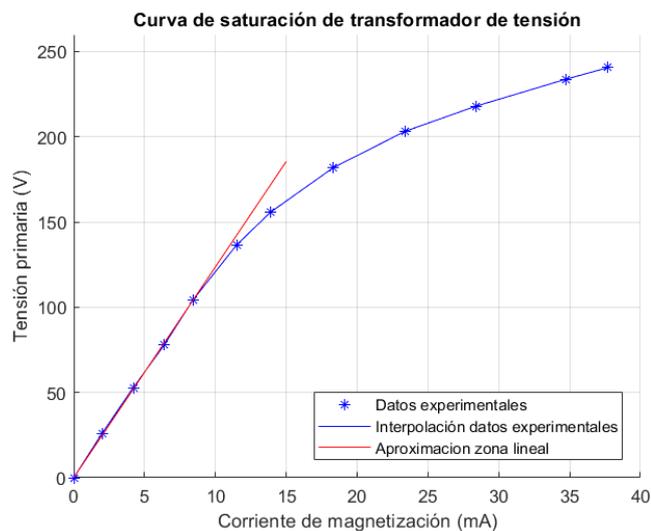


Figura 7.30: Curva de saturación del transformador de voltaje.

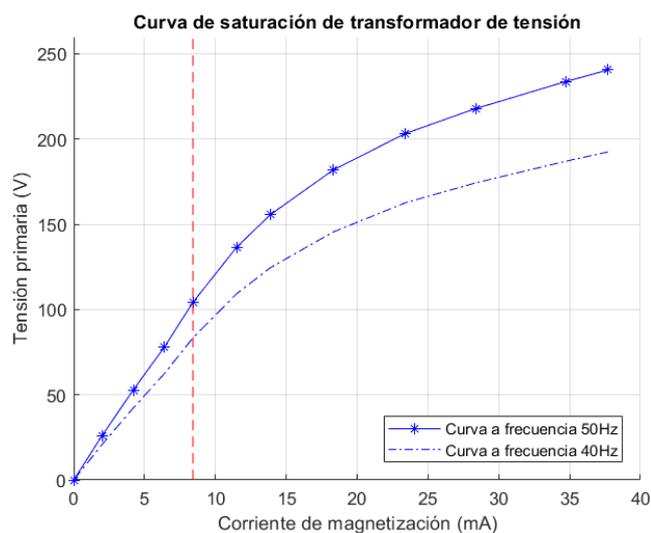


Figura 7.31: Curva escalada a la frecuencia nominal del motor.

$$k_{12} = \frac{n_1}{n_2} = 10,99 \quad k_{13} = \frac{n_1}{n_3} = 21,67 \quad k_{14} = \frac{n_1}{n_4} = 5,49 \quad (7.19)$$

### Divisor de voltaje

El voltaje nominal del motor es 380 V, y no se cuenta con un neutro accesible, por lo que se debió alimentar el divisor a un voltaje de  $V = 380$  V. Por seguridad se consideró que el voltaje de línea es de 400 V, entonces, planteando el divisor de voltaje se obtiene la Ecuación 7.20:

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

$$U_2 = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (7.20)$$

La potencia disipada por cada resistencia se calcula de la siguiente manera:

$$P_{R_i} = \frac{U_{R_i}^2}{R_i} \quad i = 1, 2 \quad (7.21)$$

Como se vio en la Sección 7.5.1, para que el transformador no sature a una frecuencia de 40 Hz, el voltaje debe ser menor a 75 V. Además, para que efectivamente sea un divisor de voltaje, no puede circular corriente por el transformador. Para lograr tal propósito la impedancia de vacío vista desde el primario del transformador debe ser mucho mayor que  $R_2$ .

La impedancia de vacío del transformador a 50 Hz vista desde el primario se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$X_0 @ 50Hz = \frac{u_o}{i_{m_o}} = \frac{55,23 V}{8,41 mA} = 6,56 k\Omega \quad (7.22)$$

Las resistencias elegidas son:

- $R_1 = 12,67 k\Omega$ ,  $P_n = 15 W$
- $R_2 = 47,30 \Omega$ ,  $P_n = 0,5 W$

Con estos valores, el voltaje en la resistencia  $R_2$  y  $R_1$  serán  $U_2 = 1,49 V$  y  $U_1 = 398,51 V$  respectivamente. La potencia disipada por cada una de ellas es  $P_{R_1} = 12,53 W$  y  $P_{R_2} = 0,047 W$ . Se pudo verificar que las resistencias elegidas cumplen con todos los requerimientos.

Notar que la resistencia  $R_2$  elegida es más de 100 veces menor que la impedancia vista del transformador, por lo que se puede garantizar que el divisor de voltaje se comportará como tal.

### Filtro pasa-bajos

El voltaje entregada por el variador de frecuencia tiene muchos armónicos en altas frecuencias, los cuales no aportan para la potencia. Debido a esto se utiliza un filtro pasa-bajos. Se hace uso de un filtro pasa-bajos ya construido. Este tiene un amplificador operacional a la entrada, por lo que la impedancia de entrada del filtro es infinita, es decir, por él no circulará corriente. El diagrama de Bode del filtro se muestra en la Figura 7.32.

Es para destacar que a la frecuencia de 40 Hz, el filtro tiene una ganancia de  $|H| = 9,93 V/V = 19,95 dB$ , y un desfase igual a  $\arg(H) = -193,8^\circ$  (se denota H como la transferencia del filtro). Esto se deberá tener en cuenta para calcular el voltaje.

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

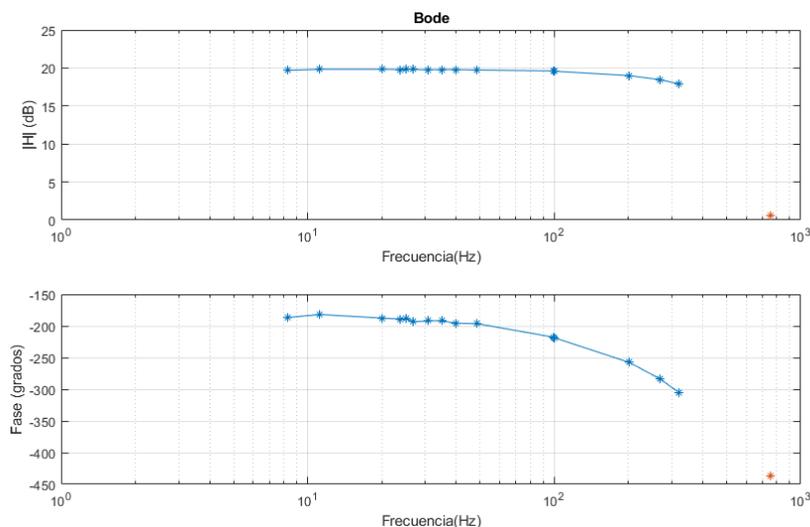


Figura 7.32: Ensayo en frecuencia del filtro pasa-bajos.

Se puede apreciar que efectivamente es un filtro pasa-bajos dado que atenúa las señales de frecuencia elevada. La frecuencia de corte se da para  $f_c = 365$  Hz dado que para esa frecuencia la ganancia es 3 dB menor a la frecuencia de banda plana. Esto significa que este filtro no atenuará los armónicos 5, 7, 11 y 13.

No se puede perder de vista que el amplificador operacional se debe alimentar con  $\pm 12 V_{DC}$ , lo que hace que el voltaje de salida no pueda superar tal voltaje. Por lo tanto, se tomará como cota máxima a la entrada del filtro un voltaje de 1,21 V, por lo que si se utiliza el cuarto bobinado del transformador, se trabajará a un voltaje de:

$$1,49 V * k_{41} * |H| = 2,70 V$$

Con lo cual, no se corre con ningún riesgo de que el operacional sature. Siendo 1,49 V, el voltaje entregada por el divisor resistivo.

### 7.5.2. Medida de corriente

La medida de corriente se realizó con un transformador de corriente, con su primario intercalado entre una de las fases del variador de frecuencia y el motor, como muestra la Figura 7.28. Se debió conectar en el secundario del transformador una resistencia de valor y potencia adecuada, a fin de poder medir con un canal del osciloscopio la diferencia de voltaje resultante. Cabe destacar que en este caso no se necesitó ningún filtro, dado que el motor se encarga de filtrar la señal en sus bobinados estáticos. En la Figura 7.33 se muestra el circuito que se implementó para realizar la medida de corriente.

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

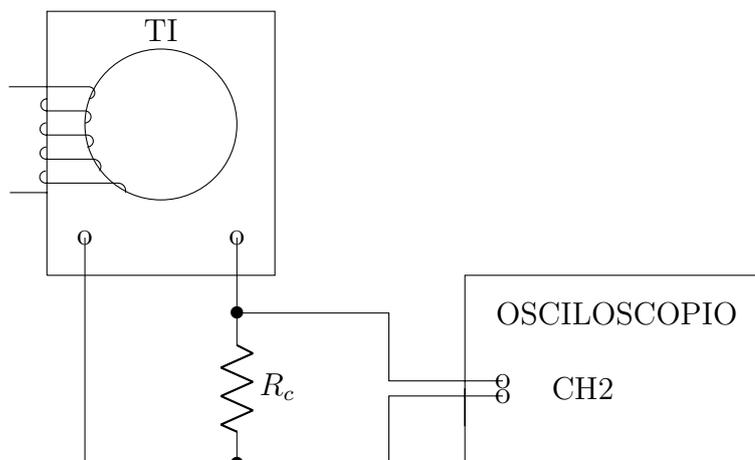


Figura 7.33: Circuito para medir la corriente.

### Transformador de corriente

El transformador de corriente que se utilizó tiene una relación de transformación de 2,5-10-25-100-125-200-500/5 A/A, que se logran enrollando el cable en el toroide, o conectando el transformador en serie a través de bornes accesibles. Se destaca que su potencia nominal es de 5 VA.

Se procedió a hallar la curva de saturación del transformador en vacío, la cual se muestra en la Figura 7.34. Se puede apreciar que la zona lineal del transformador es en el rango que va desde 0,4 a 1 V. Escalando la curva a 40 Hz, se obtiene que la zona lineal se da entre los voltajes de 0,3 a 0,6 V.

### Resistencia de carga del TI

Para obtener el valor de la resistencia de carga a conectar en el bobinado secundario, se considera el rango de corrientes que se pueden dar en el bobinado primario. Considerando el caso límite de corriente máxima en el primario, que se da con el mayor desequilibrio del torque en el motor, es decir, con la cabina vacía y en el piso más elevado, se tiene que:

$$\tau_{max} = \frac{|M_{cabina} - m_{cable} - M_{contrapeso}| \cdot gr}{2} \simeq 196,98 \text{ Nm} \quad (7.23)$$

A modo de cota, se puede considerar que existe una relación de proporcionalidad entre el torque y la corriente. Es así que el máximo valor de corriente será:

$$I_{1max} = \frac{196,98 \text{ Nm}}{310 \text{ Nm}} \cdot 13,5 \text{ A} = 8,58 \text{ A} \quad (7.24)$$

De todas formas estos valores fueron corroborados en campo. En vista de que no es conveniente exceder un voltaje secundaria de 0,5 V, y haciendo uso de la relación de transformación 25/5 A/A, se tiene que:

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

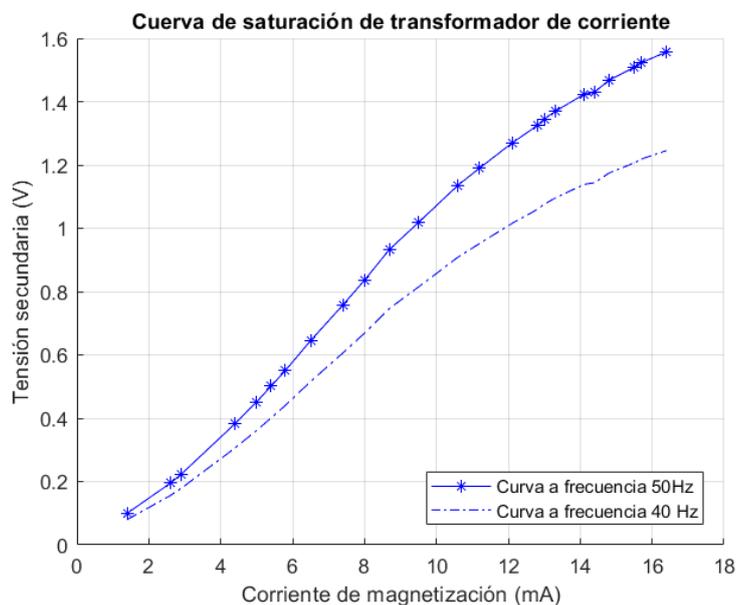


Figura 7.34: Curva de saturación del transformador de corriente.

$$I_{2max} = \frac{5}{25} \cdot 8,58A = 1,72 A \quad (7.25)$$

$$R \simeq \frac{0,5V}{1,72A} = 0,29 \Omega \quad (7.26)$$

Es así que, si se opta por colocar una resistencia de valor  $0,3 \Omega$  y potencia  $4 W$ , esta impondrá una diferencia de voltaje entre sus bornes de  $0,52 V$  como máximo, permitiendo medir corrientes de hasta:

$$I_{2min} = \frac{0,3V}{R} = 1 A \quad (7.27)$$

En vista de que el voltaje mínimo admisible es de  $0,3 V$  a  $40 Hz$ , esta corriente mínima tiene su correlato en el primario, con un valor de  $5 A$ , lo que equivale a un torque de valor:

$$\tau_{min} = \frac{310Nm}{13,5A} \cdot 5A = 114,8 Nm \quad (7.28)$$

La potencia que debe disipar la resistencia es como máximo de:

$$P_R = \frac{(0,52V)^2}{0,3} = 0,90 W \quad (7.29)$$

Y se concluye que esta combinación resulta posible.

Si ahora se analiza otra posibilidad, que sería utilizar otra relación de transformación, por ejemplo  $10/5 A/A$ , en este caso se tendría que para la máxima corriente de primario:

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

$$I_{2max} = \frac{5}{10} 8,58 A = 4,3 A \quad (7.30)$$

$$R \simeq \frac{0,5V}{4,3A} = 0,12 \Omega \quad (7.31)$$

Por lo tanto si se opta por colocar una resistencia de valor  $0,12 \Omega$  y potencia  $3 W$ , se logrará cumplir las consignas, dado que la potencia máxima será de  $2,08 W$ .

Esta combinación permite medir corrientes de hasta:

$$I_{2min} = \frac{0,3V}{R} = 2,5 A \quad (7.32)$$

Esto equivale a un torque de valor:

$$\tau_{min} = \frac{310Nm}{13,5A} 2,5A = 57,41 Nm \quad (7.33)$$

Para que el transformador asegure cierto rango de precisión, se debe tener el secundario a un determinado nivel de carga, dado que si no es así el fabricante no da seguridad alguna en la medida. En este caso, el transformador operará subcargado por la propia dinámica del sistema a medir. Es por esto que se analizó qué tan buena es la relación de transformación para algunos escenarios de carga, a la vez que se analizaba si el mismo introducía algún tipo de desfase, lo cual no ocurrió.

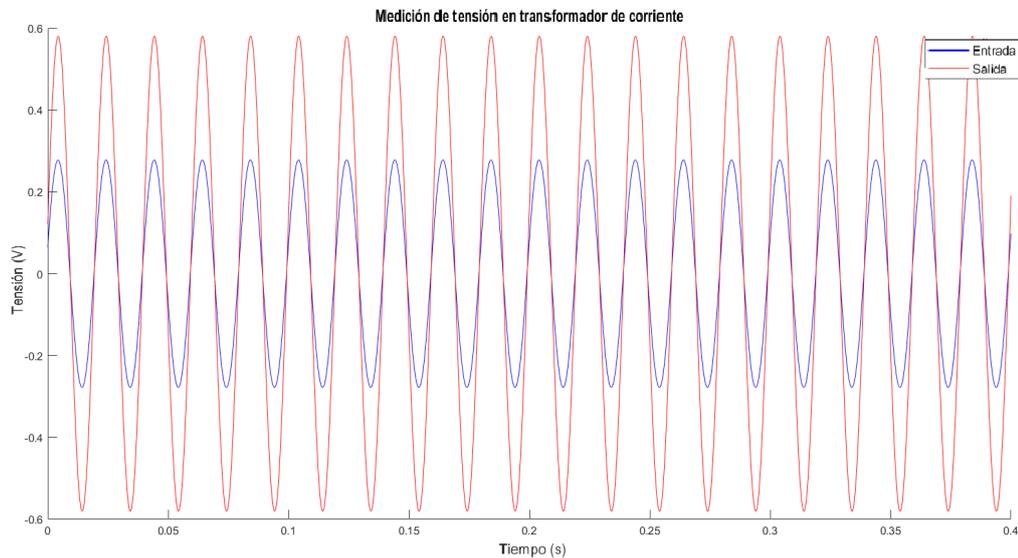


Figura 7.35: Verificación de desfase nulo introducido por el TI a frecuencia  $50 Hz$  con relación  $25/5$ .

Para una entrada de  $6,6 Arms$  ( $0,26 V$ ) en el primario, se obtienen  $1,2 Arms$  en el secundario. Lo que es equivalente a observar  $0,36 Vrms$  en la salida ( $0,51 V$ ). En cambio se obtuvieron  $0,57 V$  en dicho canal. Esto se debe probablemente a que

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

la comprobación de corriente fue realizada con una pinza amperimétrica, la cual debió ser bobinada con un conductor para poder alcanzar una lectura estable.

### 7.5.3. Dispositivo de medida

Parte del divisor resistivo, el transformador y el filtro, se colocaron en una caja con borneras y conectores que sirven para alimentar el filtro. La referencia es: cable rojo para el voltaje +12 V, cable amarillo para la referencia de tierra 0 V, y cable negro para el voltaje -12 V. Todos estos se conectarán a la fuente de alimentación DC, o en su defecto a baterías.

Los bornes son conectados a las fases de la red y a la resistencia de 12,67 k $\Omega$  de la siguiente forma: el borne rojo se conecta directamente a una de las fases, y el borne negro se conecta a la resistencia, la que debe conectarse en su otro extremo en la segunda fase del motor.

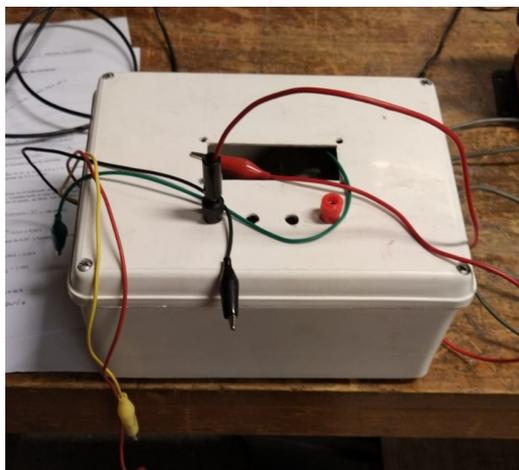


Figura 7.36: Equipo de medición de voltaje.

### 7.5.4. Medida de Potencia

Para medir la potencia que consume o entrega el motor, se adquirieron las ondas de voltaje y corriente para algunos viajes. Se calculó la potencia instantánea a partir del producto de ambas señales. Se demostrará que solamente el primer armónico del voltaje es el que contribuye en la potencia, y para ello se supone que tanto el voltaje como la corriente cuentan con su componente fundamental y demás armónicos:

$$v(t) = \sum_{i=1}^{\infty} V_i \cdot \cos(\omega_i t + \alpha_i) \quad (7.34)$$

$$i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} I_i \cdot \cos(\omega_i t + \beta_i) \quad (7.35)$$

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

Por lo tanto, al realizar el producto  $v(t) \times i(t)$ , lo que se obtiene es lo siguiente:

$$v(t) \times i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} V_i \cdot \cos(\omega_i t + \alpha_i) \times \sum_{j=1}^{\infty} I_j \cdot \cos(\omega_j t + \beta_j) \quad (7.36)$$

Reordenando términos, a partir de la convergencia de las series:

$$p(t) = v(t) \times i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} V_i I_j \cdot \cos(\omega_i t + \alpha_i) \cdot \cos(\omega_j t + \beta_j)$$

Haciendo uso de la fórmula trigonométrica de producto de cosenos:

$$\cos(A) \cos(B) = \frac{\cos(A+B) + \cos(A-B)}{2}$$

Se obtiene esta variante de la ecuación:

$$p(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{V_i I_j}{2} [\cos((\omega_i + \omega_j)t + (\alpha_i + \beta_j)) + \cos((\omega_j - \omega_i)t + ((\alpha_i - \beta_j)))] \quad (7.37)$$

Descomponiendo esta doble sumatoria en los términos con índices iguales e índices diferentes:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{V_i I_i}{2} [\cos((2\omega_i)t + (\alpha_i + \beta_i)) + \cos((\alpha_i - \beta_i))] \quad (7.38)$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1, j \neq i}^{\infty} \frac{V_i I_j}{2} [\cos((\omega_i + \omega_j)t + (\alpha_i + \beta_j)) + \cos((\omega_j - \omega_i)t + ((\alpha_i - \beta_j)))] \quad (7.39)$$

Analizando el término de índices iguales 7.38, se puede ver que está compuesto por dos partes, una que depende del tiempo y otra constante.

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{V_i I_i}{2} [\cos((2\omega_i)t + (\alpha_i + \beta_i))] + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{V_i I_i}{2} [\cos((\alpha_i - \beta_i))] \quad (7.40)$$

Si se realiza la integración de 7.37 en un período de tiempo igual al inverso de la frecuencia fundamental, se puede observar que cualquier término que contenga cosinusoides dependientes del tiempo se anulará, debido a que el intervalo de integración será  $k \cdot T_l$ , con  $T_l$  sus períodos y  $k$  un número natural. Por lo tanto el resultado de la integración es el siguiente:

$$\frac{1}{T} \int_0^T v(t) \times i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{V_i I_i}{2} [\cos((\alpha_i - \beta_i))] dt = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{V_i I_i}{2} [\cos((\alpha_i - \beta_i))] \quad (7.41)$$

La existencia de armónicos no termina afectando en el cálculo de potencia, siempre que se los considere apareados. En este caso, se espera que la corriente no

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

presente armónicos, por lo tanto sólo se tendrá un único término correspondiente a los fundamentales.

$$\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{V_1 I_1}{2} [\cos((\alpha_1 - \beta_1))] \quad (7.42)$$

Una vez demostrado que solamente el primer armónico del voltaje es el que contribuye en la potencia, se deben discutir los cambios que introducen los circuitos utilizados para poder medir voltaje.

La potencia del motor se debe hallar a través de la Ecuación 7.43, siendo  $U$  el voltaje compuesto eficaz a la salida del variador,  $I$  la corriente eficaz de línea y  $\cos \phi$  el factor de potencia.

$$P_n = \sqrt{3} U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi \quad (7.43)$$

Por su parte, el voltaje compuesto se debe determinar como indica la Ecuación 7.44, siendo  $U_{ch1rms}$  el voltaje eficaz medido en el canal 1 del osciloscopio.

$$U_{rms} = U_{ch1rms} \cdot \frac{1}{|H|} \cdot k_{14} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (7.44)$$

Para medir correctamente el factor de potencia, hay que tener en cuenta el desfase que otorga el filtro pasa-bajos ( $\arg(H) = -193,8^\circ$ ), y el desfase propio de medir el voltaje compuesto. Por ello, el factor de potencia se debe medir mediante la siguiente ecuación:

$$\cos(\phi) = \cos(\phi_{osc} - \arg(H) - 30^\circ) \quad (7.45)$$

Una forma de medir el desfase entre las ondas de voltaje en el osciloscopio, es calculando la diferencia de tiempo ( $\Delta t$ ) entre dos cruces por cero de ambas ondas. Este desfase temporal se relaciona con el desfase en grados de la siguiente manera:

$$\phi_{osc}(rad) = \Delta t \cdot 2\pi \cdot f \quad (7.46)$$

Solo resta hallar el valor de la corriente, para lo que se utiliza el voltaje del canal 2, aplicando la ley de Ohm sobre la resistencia, en conjunto con la relación de transformación del TI  $k$ :

$$I_{rms} = \frac{U_{ch2rms} \cdot k}{R_c} \quad (7.47)$$

### Resultados obtenidos

Se obtuvieron las medidas de varios viajes, la limitante presentada es que el osciloscopio utilizado solo puede guardar 12.500 muestras. A lo largo de un viaje

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

el voltaje y la corriente varía, ya que como se vio en las secciones previas, el torque va cambiando a lo largo del viaje.

En la Figura 7.37 se muestra el voltaje obtenido con el osciloscopio proporcional a la corriente. Como se preveía, la corriente adquirida no contiene armónicos.

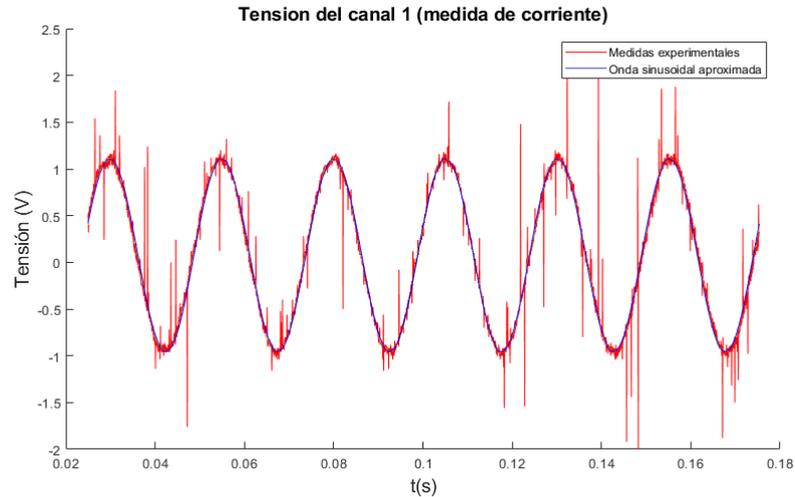


Figura 7.37: Voltaje adquirido proporcional a la corriente.

Como era de esperar, el voltaje presenta un mayor contenido armónico, dado que la frecuencia de corte del filtro es  $f_c = 365$  Hz. En la Figura 7.38 se exhibe el voltaje proporcional adquirido con el osciloscopio al voltaje de entrada del motor.

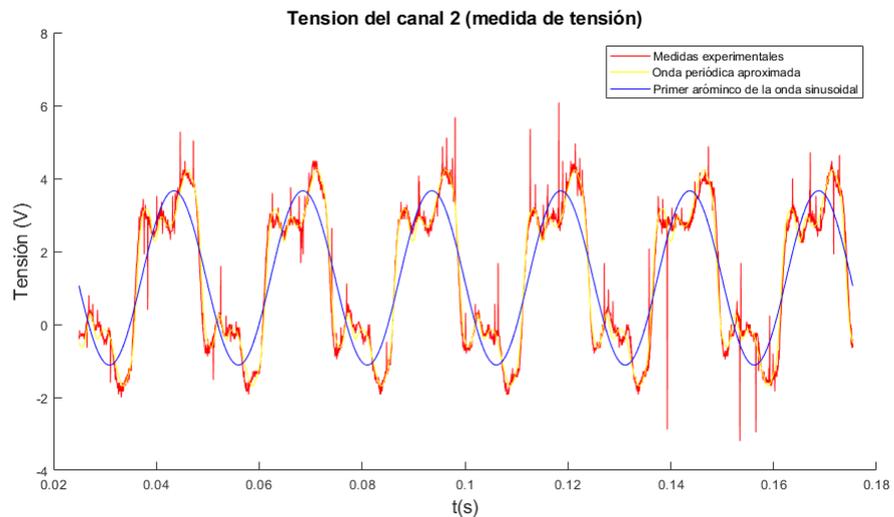


Figura 7.38: Voltaje adquirido en osciloscopio proporcional al voltaje de alimentación del motor.

Como se puede notar, el tercer armónico tiene un valor significativo. En la Figura 7.39 se presenta el contenido armónico de la señal antes mencionada.

## Capítulo 7. Campaña de mediciones

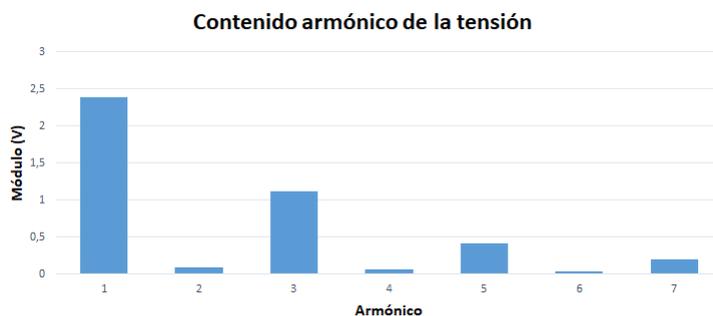


Figura 7.39: Contenido armónico del voltaje.

Se calculó el valor medio de la potencia cada cinco períodos. Esto es, cada cinco períodos de la señal, se aproximó la onda de voltaje y corriente a una sinusoidal. En la Figura 7.40 se compara la potencia otorgada por el variador con la calculada a través de las señales adquiridas en el osciloscopio, para un viaje vacío de planta baja al décimo-primer piso del edificio, por lo que el motor genera potencia.

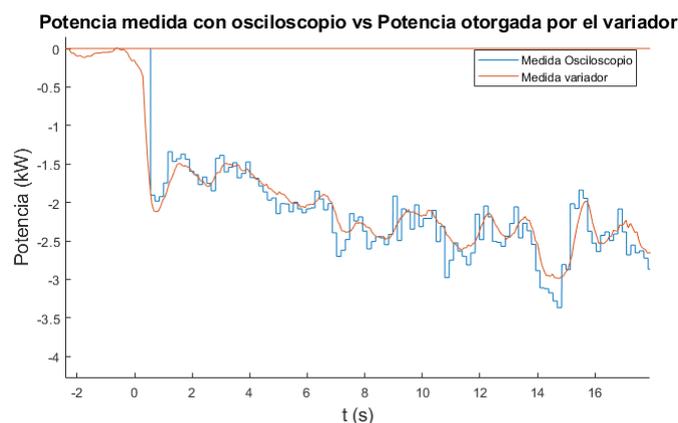


Figura 7.40: Potencia calculada vs Potencia entregada por el variador, viaje de 0 a 11 vacío.

Se pudo comprobar que, la potencia medida con el osciloscopio cuando el motor genera potencia, coincide con la medida por el variador. Falta estudiar el caso en el que el motor consume potencia, para lo cual se muestra en la Figura 7.41 un viaje del piso 5 a planta baja con 2 personas. Se puede notar que los resultados son similares.

En conclusión, se pudo comprobar que la potencia otorgada por el variador es efectivamente la potencia que se podría regenerar si se utiliza un driver regenerativo.

## 7.5. Medida de potencia con osciloscopio

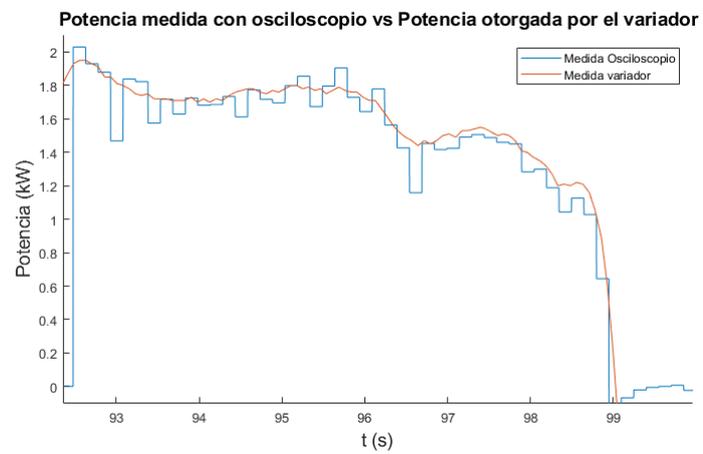


Figura 7.41: Potencia calculada vs Potencia entregada por el variador, viaje de 5 a 0 con 2 personas.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 8

## Simulación

El objetivo de este proyecto es poder cuantificar la energía generada por cualquier ascensor, de forma tal de poder realizar un estudio de los drivers regenerativos, analizando la viabilidad de los mismos. Para eso se construyó una plataforma de simulación en el entorno Matlab & Simulink que es capaz de representar el funcionamiento de cualquier ascensor. Para ello se debe ingresar sus parámetros característicos, devolviendo todas las magnitudes eléctricas del sistema que se pueden medir.

Además se realizó una interfaz gráfica de forma tal que la comunicación con la simulación sea más cómoda y amigable para el usuario, volviéndose sencillo el ingreso de los datos y la construcción de las curvas de entrada.

La Sección 8.2 está destinada a explicar de forma detallada los pasos a seguir para poder simular el funcionamiento de cualquier ascensor, es decir, está orientada al uso de la simulación. Por otro lado, la Sección 8.1 se centra en la construcción de la simulación, se explica de forma detallada los bloques que se tuvieron que construir y se muestra la idea global de los bloques utilizados de la librería de Simulink.

### 8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink

Para realizar la simulación del ascensor en Matlab & Simulink se estudió detalladamente el modelo del ascensor, dividiéndolo en el modelo eléctrico y el modelo mecánico.

La simulación tiene como parámetros de entrada la velocidad y la carga del ascensor. Esta debe ser fácil de utilizar, ya que no es viable que el usuario tenga que construir tales curvas. Es por esto que se implementó un código de Matlab que las construye.

### 8.1.1. Curvas de entradas

Se implementó un código en Matlab el cual lee en una planilla de excel los parámetros que caracterizan un edificio y los viajes que se quieren realizar. Es importante diferenciar estos dos tipos de datos, ya que con los parámetros del edificio se calcula la distancia que debe recorrer el ascensor, ingresando además la característica de la curva de velocidad, de forma tal de que efectivamente la cabina recorra los metros deseados. Por otro lado, se deben ingresar los viajes que se desean simular, es decir, los pisos que se quieren recorrer. En la Sección 8.2.3 se explica detalladamente qué parámetros se deben ingresar en la planilla de excel.

El código construye la curva de velocidad (utilizando la dinámica del ascensor) y la carga del ascensor para cada viaje. El programa se encarga de que la curva de velocidad de cada viaje se corresponda con la carga de ese viaje. En la Figura 8.1 se muestran las curvas de entrada para algunos viajes.

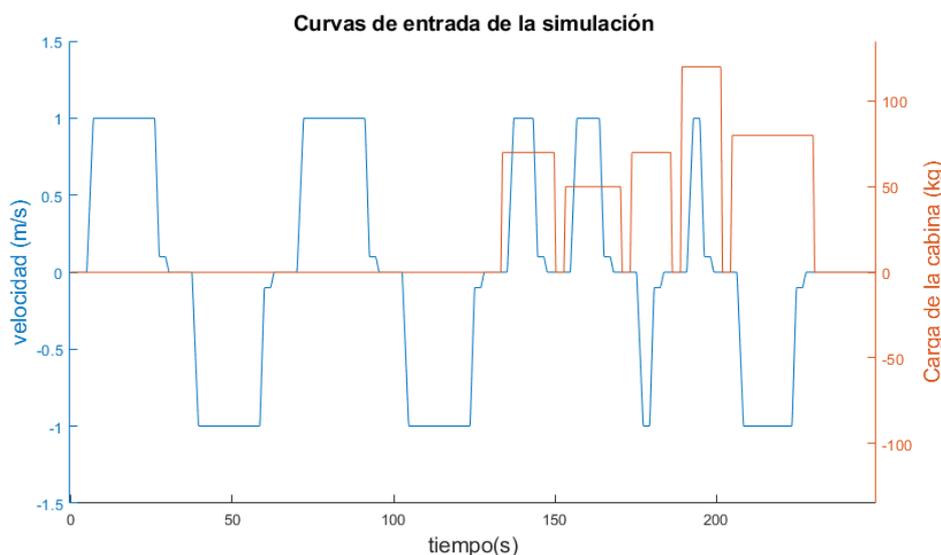


Figura 8.1: Curvas de entrada de la simulación.

Luego de haber construido las curvas, el código implementado exporta un archivo "curvas\_de\_entrada.xlsx", el cual contiene los vectores construidos. Luego, se debe importar tal archivo en el bloque "Signal Builder". Mediante la interfaz se pudo lograr que estos pasos se lleven a cabo de forma sencilla.

Se optó por no realizar las curvas mediante bloques en Simulink porque el costo computacional de llevar a cabo eso es muy elevado. Para construir las curvas de entrada, se tiene el bloque "Lookup Tables", con la ventaja de que no se debe importar nada, el usuario solamente tendría que ingresar los pisos que se querían simular. Sin embargo, como fue mencionado, el costo computacional lo hizo inviable.

La limitación que tiene este programa es que el tiempo de duración de la

## 8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink

velocidad de nivelación se toma constante. En los primeros dos edificios se vio que tal parámetro se mantenía así, pero en el último edificio esto no se vio. La explicación de lo sucedido es que cuando la velocidad del ascensor no llega a la velocidad nominal, el tiempo que dura la curva de nivelación aumenta. Esto no fue implementado debido a que si se enfoca en la potencia, la duración de la velocidad de nivelación no produce un gran cambio.

### Validación de las curvas de entrada

Para demostrar que el código funciona de forma correcta, se debe ver que la curva de entrada tiene la forma buscada, y que además recorra los metros estipulados. Como se hizo en el análisis de las medidas obtenidas con el variador, los metros recorridos se obtienen integrando la curva de velocidad.

Se mostrará como ejemplo las curvas realizadas para el primer edificio medido. Los datos ingresados en el programa se muestran en la Tabla 8.1, los parámetros  $t_3$  y  $t_4$  se definen como el tiempo de inicio y fin de la velocidad de nivelación constante, y  $t_5$  es el tiempo en el que la velocidad llega a cero.

Aceleración	$\frac{m}{s^2}$	0,51
Desaceleración	$\frac{m}{s^2}$	-0,63
V	$\frac{m}{s}$	1
$V_{niv}$	$\frac{m}{s}$	0,05
$t_4 - t_3$	s	2,5
$t_5 - t_4$	s	0,38
Distancia teórica recorrida	m	28,2

Tabla 8.1: Parámetros característicos del edificio.

En la Figura 8.2 se exhibe la curva construida en el programa. Además, se muestra la posición de la cabina en todo el tiempo. Notar que se marcan los puntos críticos para calcular los parámetros característicos de la curva. En la Figura 8.3 se realiza un zoom en la velocidad de nivelación.

En la Tabla 8.2 se comparan los parámetros mencionados del primer viaje con los teóricos.

Se puede apreciar que las curvas construidas se ajustan de forma correcta a los datos ingresados. La mayor diferencia se da en los tiempos de la velocidad de nivelación, pero esto es originado porque se suavizaron los vértices de la curva, de forma tal de que esta sea similar a la de la realidad. A modo de ejemplo, en la Figura 8.4 se compara la curva simulada con la curva real de varios viajes del Edificio #1.

## Capítulo 8. Simulación

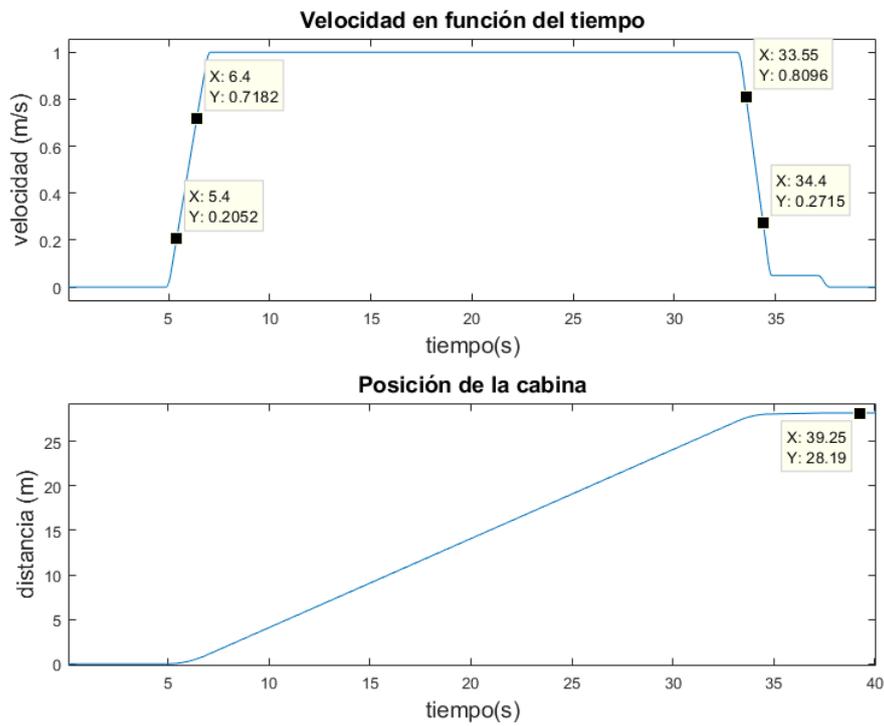


Figura 8.2: Velocidad de entrada y posición para viaje del piso 0 al 7 del primer edificio.

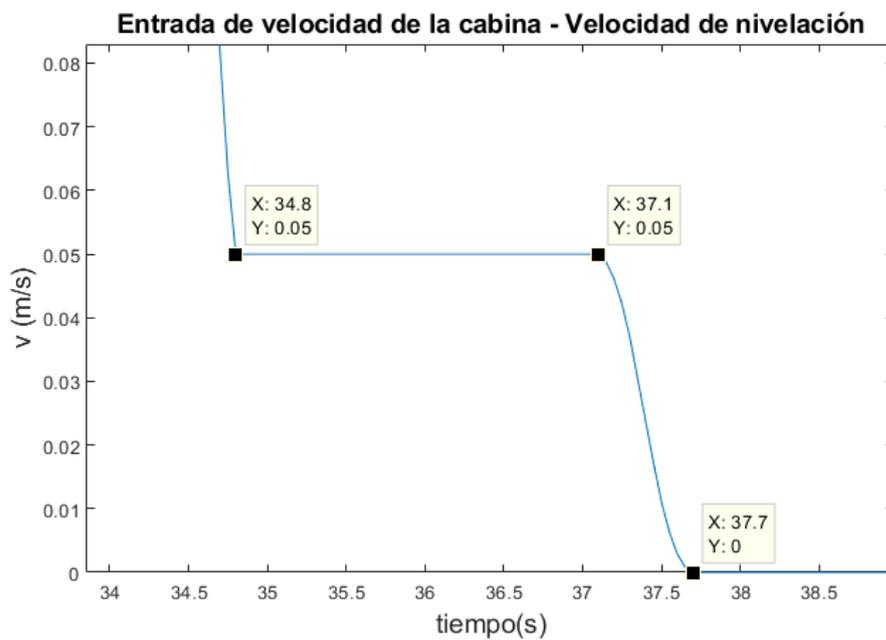


Figura 8.3: Ampliación en velocidad de nivelación.

## 8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink

	Teórico	Simulado
Aceleración (m/s <sup>2</sup> )	0,51	0,51
Desaceleración (m/s <sup>2</sup> )	-0,63	-0,63
V (m/s)	1	1
V <sub>niv</sub> (m/s)	0,05	0,05
t <sub>4</sub> - t <sub>3</sub> (s)	2,5	2,3
t <sub>5</sub> - t <sub>4</sub> (s)	0,38	0,6
Distancia teórica recorrida (m)	28,2	28,19

Tabla 8.2: Comparación entre resultados ingresados y la curva construida de velocidad.

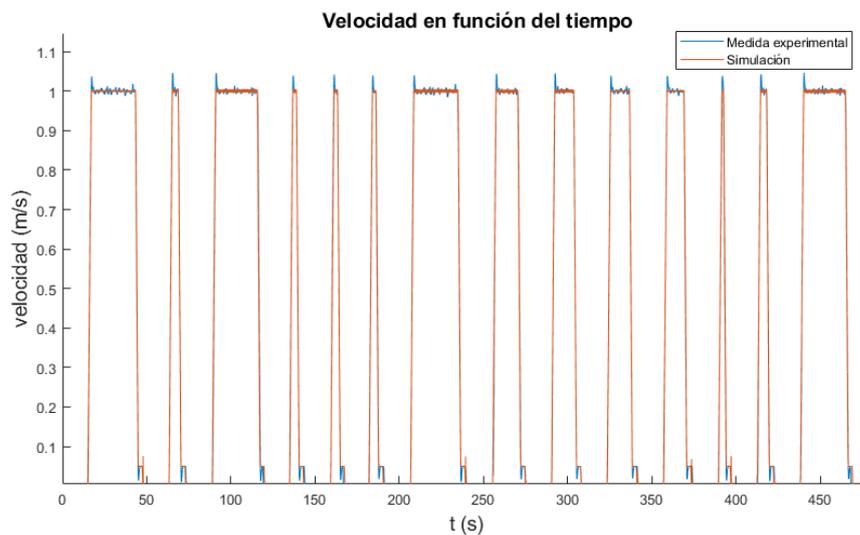


Figura 8.4: Comparación de la velocidad: simulado vs. real.

### 8.1.2. Modelo eléctrico

Para implementar el modelo eléctrico se tuvo que realizar el modelo de la red, del variador de frecuencia, del motor, y su controlador. Gracias a las contribuciones de la comunidad a la plataforma de Simulink, se pudo encontrar un bloque llamado "AC6", el cual simula el funcionamiento de un motor PMSM con su correspondiente controlador (variador de frecuencia). Este ejemplo se puede encontrar si se introduce en la ventana de comandos de Matlab "ac6\_example", en el cual aparece el modelo mostrado en la Figura 8.5.

En la Figura 8.6 se detallan todos los componentes que forman al bloque *AC6*. Se menciona brevemente cada uno, y las distintas funciones que cumplen.

El controlador es el variador de frecuencia explicado en la Sección 3.1.4. Como fue mencionado, este cuenta con el típico rectificador trifásico de diodos (*three-phase diode rectifier*), que convierte la alimentación trifásica de la red en una tensión continua, desde la cual se alimentan los demás componentes del sistema. Esto es conocido como el *bus DC*. En este bus se conecta el *braking chopper*, cuya

## Capítulo 8. Simulación

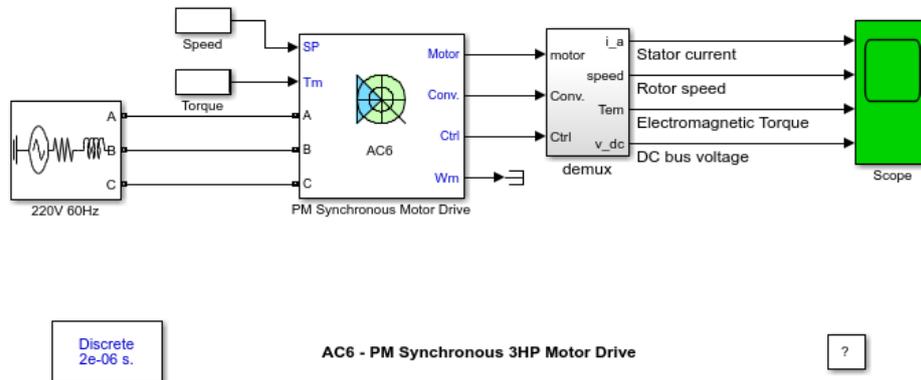


Figura 8.5: Bloque del controlador del motor en Simulink. Fuente [22].

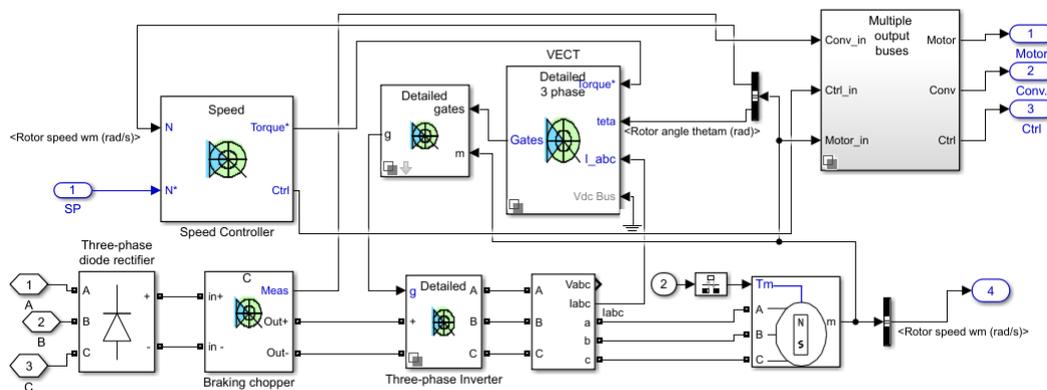


Figura 8.6: Interior del bloque AC6.

única función es disipar la energía durante los escenarios en los que el motor se comporta como generador. Continuando por el bus DC, es que se llega al inversor (*three-phase inverter*). Este elemento es el encargado de convertir la tensión DC en 3 señales pulsantes de período modulado, para alimentar al motor y así lograr una variación en la frecuencia y la tensión recibida por el mismo.

Luego se tiene el motor, que recibe las señales provenientes del inversor, entregando un torque y una velocidad en el eje acorde a la alimentación.

Para poder controlar al sistema se requiere de un control vectorial, que sense la posición angular del rotor, el torque requerido y la corriente consumida, para así dar órdenes al inversor. También se requiere de un control de velocidad, que sea capaz de comparar una consigna de velocidad con la velocidad instantánea del motor y hacer un cálculo del torque que se debería suministrar para lograr dicha consigna.

A partir de este sistema, realizando algunos ajustes en sus parámetros, se

## 8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink

pudo obtener un modelo del controlador usado en el control de ascensores. Entre los principales cambios se encuentran:

- Ajuste de la tensión de la red a 380 V.
- Ajuste de la frecuencia de la red a 50 Hz.
- Ajuste de la potencia del motor a su correspondiente valor.
- Ajuste de la corriente máxima.
- Ajuste de las inductancias de ejes directo y cuadratura.
- Ajuste de la resistencia estatórica.
- Ajuste de torque máximo.
- Ajuste del flujo magnético.
- Ajuste de los voltajes máximos y mínimos del bus DC.
- Ajuste de la resistencia de frenado.
- Ajuste del tiempo de muestreo, para darle mayor agilidad a la simulación.

Además se le hicieron algunos cambios al bloque *AC6*. Por ejemplo, se hizo accesible desde afuera del bloque la tensión del bus DC para una futura implementación de un driver regenerativo en la simulación. También se puede acceder a la potencia disipada en la resistencia de frenado del ascensor, por lo que si se quiere se puede visualizar con un osciloscopio.

### 8.1.3. Modelo mecánico

El modelo mecánico vincula la carga del ascensor con el torque que debe hacer el motor para realizar el movimiento deseado. Se hicieron dos modelos para lograr dicha relación (ver Sección 4.1). El primer modelo tiene más simplificaciones que el segundo.

Cuando se analizaron las primeras medidas, fue evidente que el primer modelo estudiado no representaba fielmente la realidad, sobre todo porque consideraba que la masa de la cuerda era despreciable, y como se estudió en la Sección 7.3.6, esta tiene un rol preponderante en la variación del torque que debe soportar el motor a lo largo de cualquier viaje.

La deducción del segundo modelo se llevó a cabo en la Sección 4.1.2; más precisamente, la Ecuación 4.23 determina el par instantáneo que debe hacer el motor, por lo que inicialmente se debe implementar esta ecuación en un diagrama de bloques. La Figura 8.7 muestra el modelo realizado en Simulink de la ecuación referenciada, notar que al torque obtenido se lo llama  $T_1$ .

## Capítulo 8. Simulación

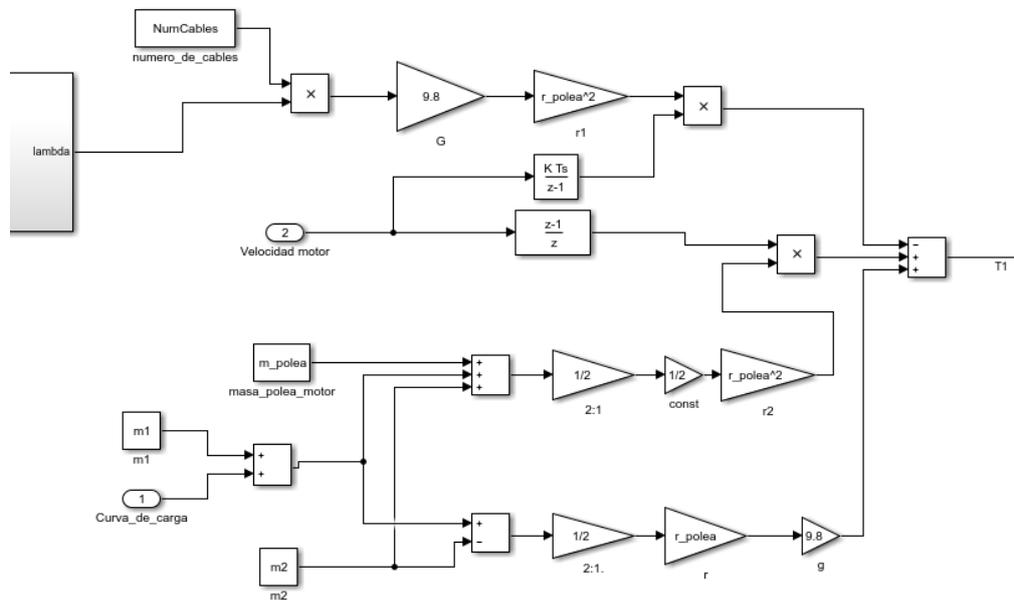


Figura 8.7: Ecuación 4.23 implementada en simulink.

Sin embargo, resta modelar algunos efectos que afectan al torque que debe hacer el motor: el frenado mecánico del motor, la fricción y la asimetría del sistema mecánico.

El motor tiene un freno de disco que cuando se activa soporta toda la carga, por lo que en ese momento el torque que debe ejercer el motor es nulo. El motor síncrono de imanes permanentes utilizado de la librería de Simulink no tiene una señal que simule un freno mecánico. Debido a esto, en el diagrama de bloques se tuvo que agregar tal funcionamiento.

## 8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink

En la Figura 8.8 se exhibe cómo se obtiene el torque que tiene que hacer el motor, el cual se logra realizando el producto entre el torque  $T_1$  y la señal de freno. La señal de freno debe activarse por nivel bajo, es decir, si el freno se enciende el torque a ejercer por el motor debe valer cero, por lo que la señal de freno debe valer 0. De lo contrario, el torque está dado por la ecuación mencionada, es decir, debe tomar el valor de  $T_1$  por lo que la señal de freno tiene que valer 1.

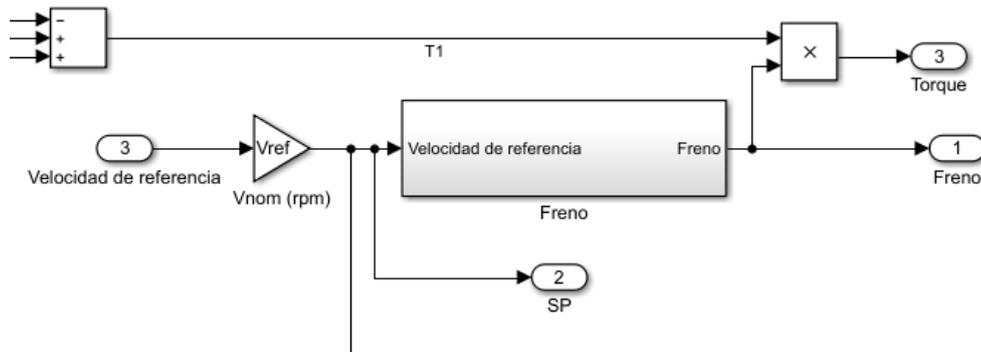


Figura 8.8: Señal de freno implementada en simulink.

En la simulación se controla la señal de freno a través de la velocidad de referencia. Esto significa que si la velocidad de referencia es nula, entonces el freno se activa y el torque que debe hacer el motor también es nulo. En la Figura 8.9 se muestra el modelo del freno. Vale resaltar que la velocidad de referencia es la velocidad de entrada de la simulación, por lo que no tiene ruido ni pequeñas variaciones.

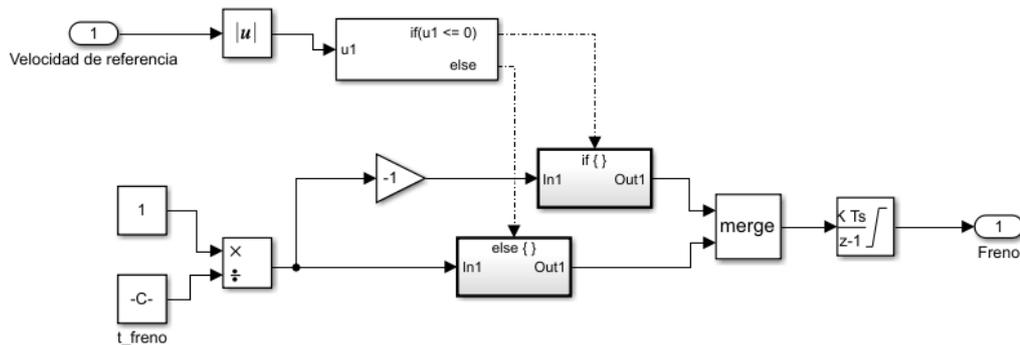


Figura 8.9: Señal de freno implementada en simulink.

Si la señal de freno cambia instantáneamente de valor, como un escalón, ocurre un pico en la velocidad, es por esto que se tuvo que hacer que se active mediante una rampa y no un escalón. Para esto el usuario deberá ingresar el tiempo en el que tarda en activarse el freno ( $t_{freno}$ ).

## Capítulo 8. Simulación

En la Figura 8.10 se muestra la velocidad de referencia, la señal de freno y el torque para algunos viajes. Cuando la velocidad es cero el torque también lo es y la señal de freno es cero, tal y como se describió anteriormente.

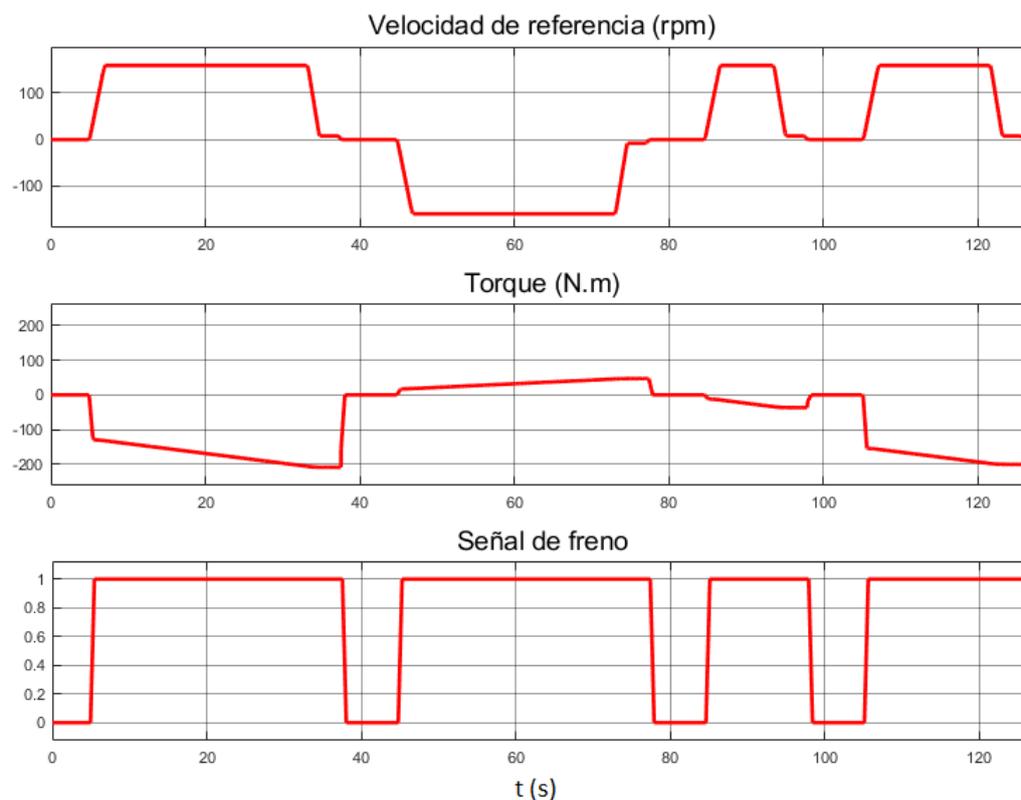


Figura 8.10: Comportamiento de la señal de freno.

En la Figura 8.11 se compara la velocidad de referencia con respecto a la velocidad simulada del rotor. Es notorio que cuando el freno se activa o se desactiva ocurren picos en la velocidad, pero no hay que perder de vista que el objetivo de esta simulación es determinar la potencia consumida en cada viaje, y en términos de potencia estos picos son despreciables.

Otro factor que todavía no contempla la simulación es la fricción del sistema mecánico, que además presenta una asimetría cuando el ascensor sube con respecto a cuando baja. La fricción se modeló en el sistema mecánico del motor, el cual se rige a través de la Ecuación 8.1 donde  $J$  es la inercia del rotor,  $F$  el factor de fricción del rotor y el sistema mecánico,  $T_m$  el torque mecánico en el eje,  $T_e$  el torque electromagnético,  $T_f$  la fricción estática en el eje y  $\omega_m$  la velocidad angular del rotor.

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{J}(T_e - T_f - F\omega_m - T_m) \quad (8.1)$$

La fricción es modelada a través del factor de fricción del motor  $F$ . Sin embar-

## 8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink

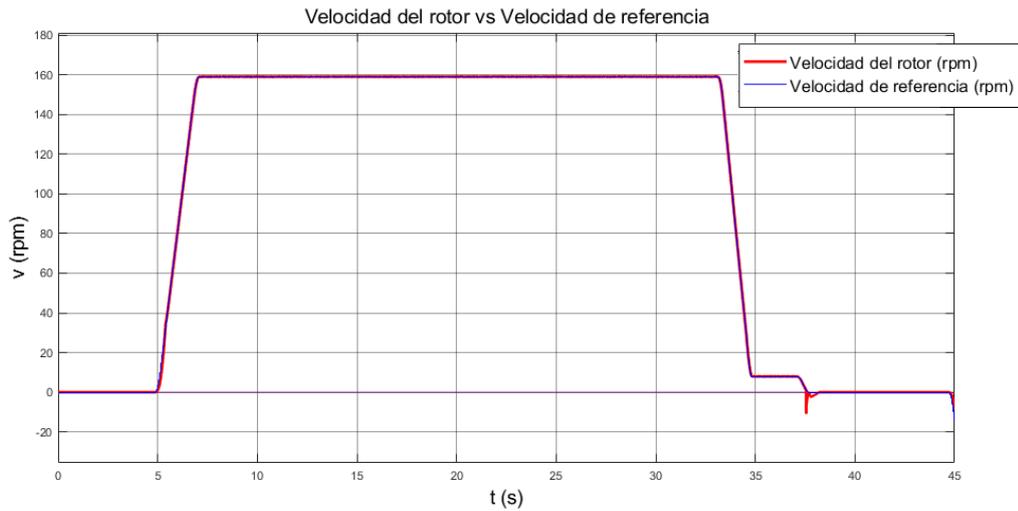


Figura 8.11: Velocidad de referencia vs velocidad simulada del rotor.

go, con el factor  $F$  no se obtiene la asimetría que presentan las medidas cuando la cabina sube con respecto a cuando baja. Esto se implementó en el sistema mecánico, considerando el factor de asimetría  $f_a$ . En la Figura 8.12 se muestra el bloque exterior del sistema implementado, el cual ayuda para obtener una idea general de lo que hace el bloque. Notar que recibe un parámetro  $\lambda$ , el cual representa la masa del cable por unidad de longitud, pero también tiene vinculado pérdidas en el movimiento de los cables por unidad de longitud. Además se debe ingresar el parámetro  $f_a$  el cual genera la asimetría buscada, entonces el bloque principal se encarga de distinguir si la velocidad es positiva o negativa y en base a eso optar por el  $\lambda$  correcto. En la Figura 8.13 se muestra el interior del bloque principal.

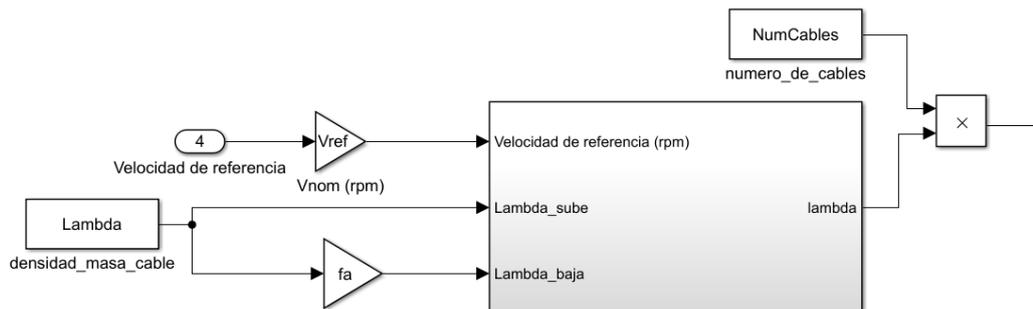


Figura 8.12: Diagrama de bloques implementado en Simulink para generar la asimetría en el torque.

Es importante aclarar que físicamente no es el  $\lambda$  estudiado en la Sección 7.3.8 el que cambia, ya que la cuerda no manifiesta ningún tipo de cambio en su estructura. Ese cambio en la magnitud está asociado a las pérdidas, las cuales varían cuando sube o cuando baja la cabina.

## Capítulo 8. Simulación

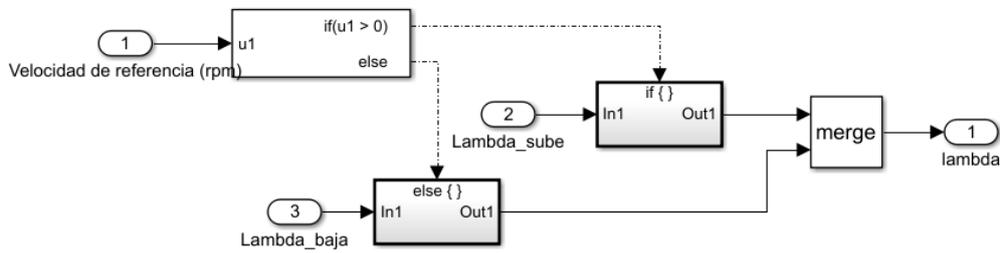


Figura 8.13: Interior del bloque principal que se encarga de generar la asimetría en el torque.

### Validación de la simulación

La validación de la simulación se realizó comparando la potencia obtenida a través de la simulación con respecto a las medidas obtenidas en los ascensores de los tres edificios medidos.

En las Figuras 8.14, 8.15 y 8.16 se compara la potencia y la energía obtenidas en la simulación con las medidas en el Edificio #1. Para el primer edificio se hará un análisis más profundo que para los restantes, dado que el comportamiento de la simulación es similar para los tres.

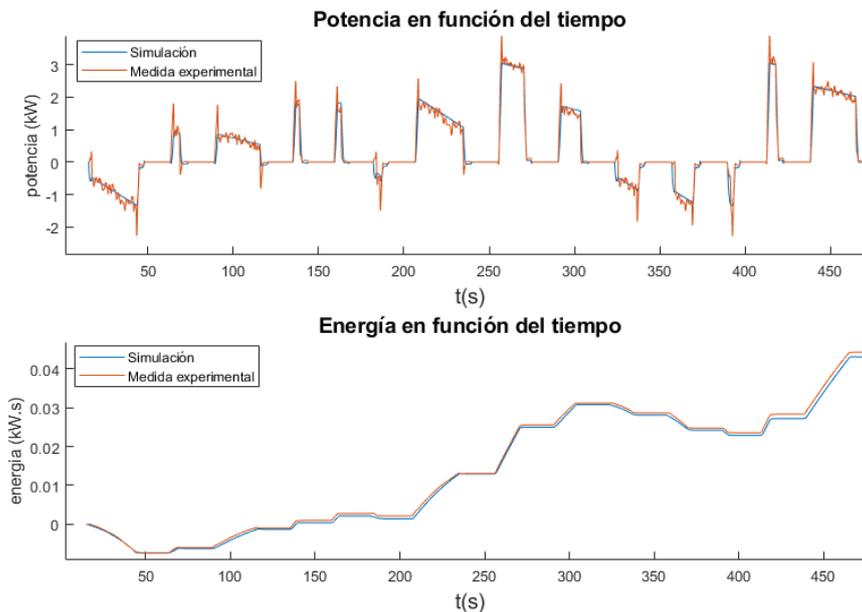


Figura 8.14: Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edificio #1.

En la Tabla 8.3 se contrastan los valores obtenidos a través de la simulación con respecto a los de las medidas para todos los viajes mostrados, especificando a

## 8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink

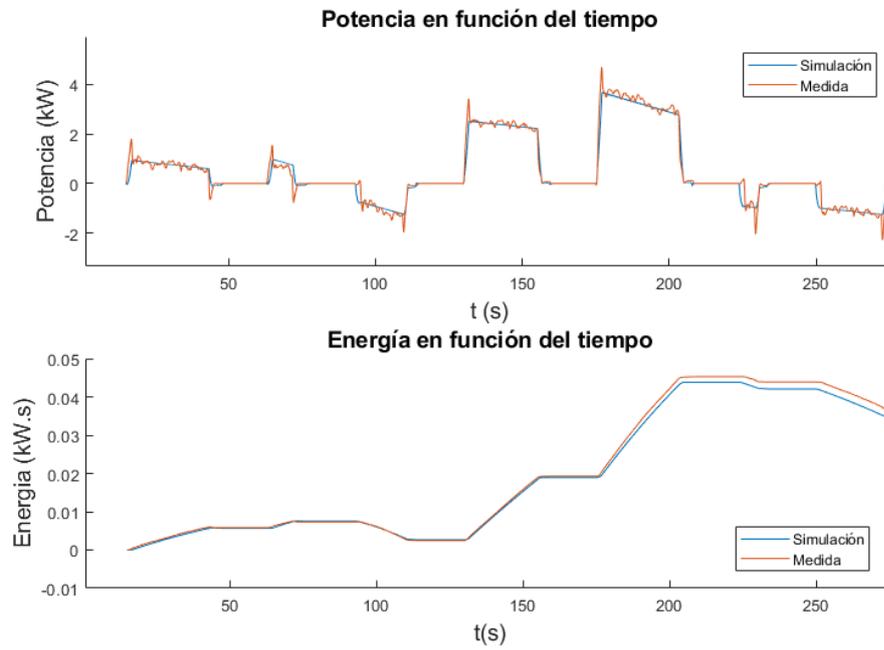


Figura 8.15: Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edificio #1.

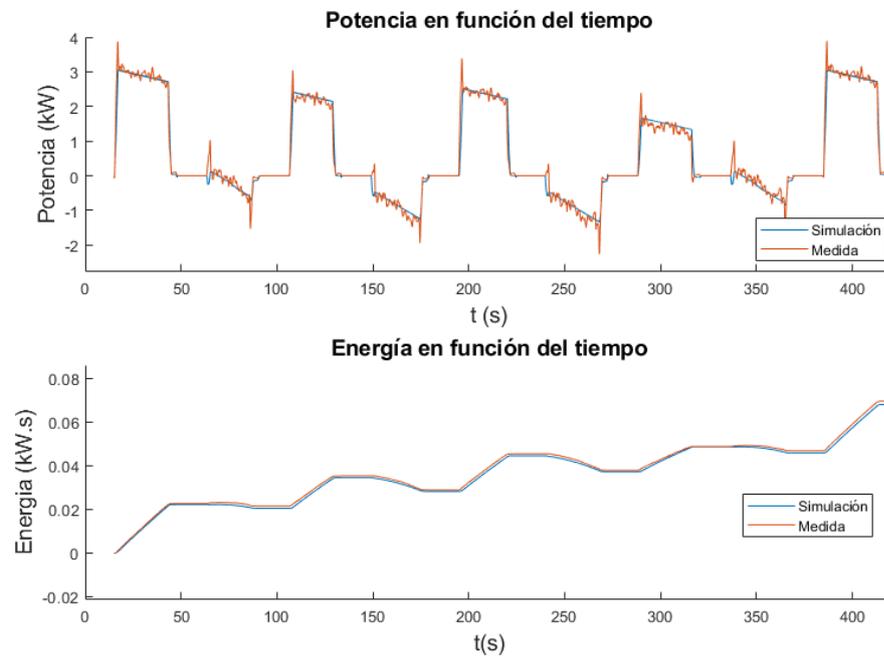


Figura 8.16: Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edificio #1.

qué figura corresponde cada viaje (los viajes se muestran en orden).

## Capítulo 8. Simulación

Figura	Partida	Llegada	# personas	Carga (kg)	E medida (W.h)	E simulada (W.h)	Error relativo (%)
8.14	0	7	0	0	-7,39	-7,32	0,9
8.14	7	5	3	250	1,39	1,12	19,4
8.14	5	-1	3	250	5	4,9	2,0
8.14	-1	0	3	250	2	1,7	15,0
8.14	0	-1	1	100	1,7	1,8	-5,9
8.14	-1	0	0	0	-0,6	-0,7	-16,7
8.14	0	7	3	278	11	11,5	-4,5
8.14	7	3	0	0	12,4	12	3,2
8.14	3	0	2	125	5,5	5	9,1
8.14	0	3	0	0	-2,5	-2	20,0
8.14	3	6	0	0	-3,8	-3,8	0,0
8.14	6	7	0	0	-1,1	-1,2	-9,1
8.14	7	5	0	0	4,8	4,4	8,3
8.14	5	-1	1	75	15,9	15,8	0,6
8.15	7	0	3	225	5,8	5,7	1,7
8.15	0	2	2	160	1,5	1,8	-20,0
8.15	2	6	0	0	-4,8	-4,8	0,0
8.15	6	0	1	70	17	16,3	4,1
8.15	0	7	6	465	26	25	3,8
8.15	7	5	6	465	-1,7	-2	-17,6
8.15	5	0	6	465	-7	-7	0,0
8.16	7	0	0	0	23	22	4,3
8.16	0	5	1	75	-22,78	-21,79	4,3
8.16	5	0	1	75	35,28	34,29	2,8
8.16	0	6	0	0	-6,5	-6	7,7
8.16	6	0	1	75	16,5	16,5	0,0
8.16	0	7	0	0	-7,5	-7,6	-1,3
8.16	7	0	2	150	10,8	11,3	-4,6
8.16	0	7	1	75	-1,9	-2,5	-31,6
8.16	7	0	0	0	22	22	0,0

Tabla 8.3: Comparación entre medidas conocidas y simulación en el Edificio #1.

En la Tabla 8.3 se muestra el error relativo entre las medidas obtenidas y las simuladas. Se presentaron 30 viajes en los cuales 23 (76%) tienen un error relativo menor al 10%. El error máximo que se obtuvo fue de un 31,6%. La forma de obtener varios viajes con distintas cargas fue realizando las medidas con un funcionamiento normal del ascensor. Lamentablemente no se tiene un valor preciso de los kilogramos de cada viaje, pero sí se sabe con precisión la cantidad de personas, es por eso que en algunos viajes el error es mayor. De todas formas, se obtuvieron muy buenos resultados.

En los otros dos edificios el error obtenido es similar a los calculados en el primer edificio. Para los otros dos edificios se muestran menos viajes pero con cargas conocidas con precisión. En las Figuras 8.17 y 8.18 se muestran viajes simulados en el Edificio #2 y #3 respectivamente. En estos casos el error relativo no superó el 7%.

En base a lo presentado es posible afirmar que se logró simular de forma precisa el funcionamiento del ascensor. Sin embargo, la gran limitación de la simulación es su tiempo de ejecución. Para reducirlo se tiene que aumentar el tiempo de muestreo, pero se debe tener presente que existe un compromiso entre el tiempo de muestreo y el control del torque del motor. La variación del torque del motor al aumentar el tiempo de muestreo aumenta significativamente. En las Figuras 8.19 y 8.20 se muestra la potencia y el torque con  $T_s = 0,5\mu s$  y  $T_s = 20\mu s$  respectivamente.

Se puede notar que al reducir el tiempo de muestreo el control del torque del

## 8.1. Modelo del ascensor en Matlab & Simulink

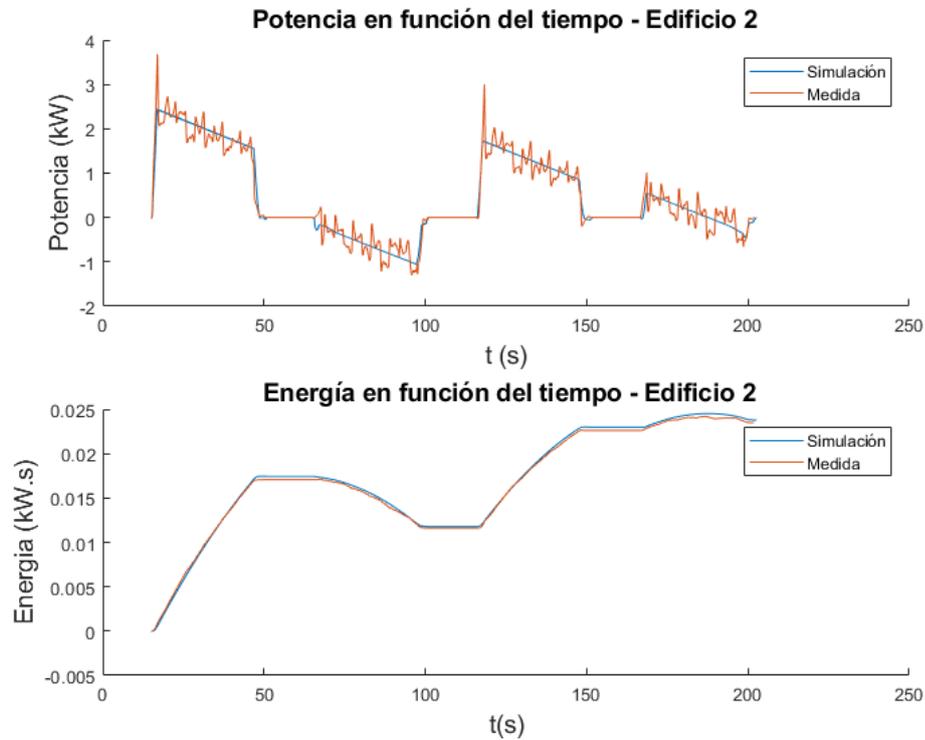


Figura 8.17: Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edificio #2.

motor mejora. No hay que perder de vista que el objetivo de la simulación es cuantificar la energía que consume el ascensor, y se puede apreciar que al variar el torque la potencia también varía. Es por esto que se deben ajustar los parámetros de la simulación para un tiempo de muestreo. El tiempo de compilación de la simulación con  $T_s = 0,5\mu s$  es de 16 minutos, mientras que con el otro  $T_s$  presentado es de 90 segundos. Se deben simular alrededor de 150 viajes, por lo que se opta por utilizar el mayor tiempo de muestreo.

En la Tabla 8.4 se exhiben los principales parámetros que se utilizaron para cada edificio y que todavía no se nombraron.

Edificio	Factor de fricción (Nms)	Flujo magnético imanes del motor (Vs)	$\lambda_{eq}$	Factor de asimetría ( $f_a$ )	Tiempo de muestreo ( $\mu s$ )
Edificio #1	6.00	1.2	0.200	0.375	20
Edificio #2	3.75	1.2	0.173	1.000	20
Edificio #3	2.00	1.0	0.162	1.375	20

Tabla 8.4: Parámetros característicos de la simulación en los edificios medidos.

## Capítulo 8. Simulación

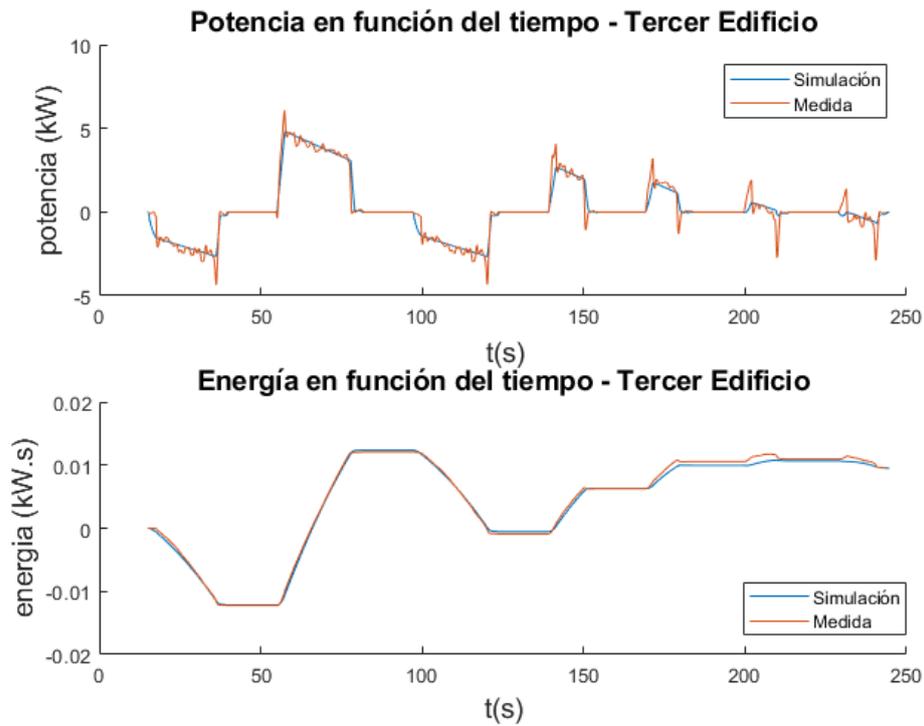


Figura 8.18: Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edificio #3.

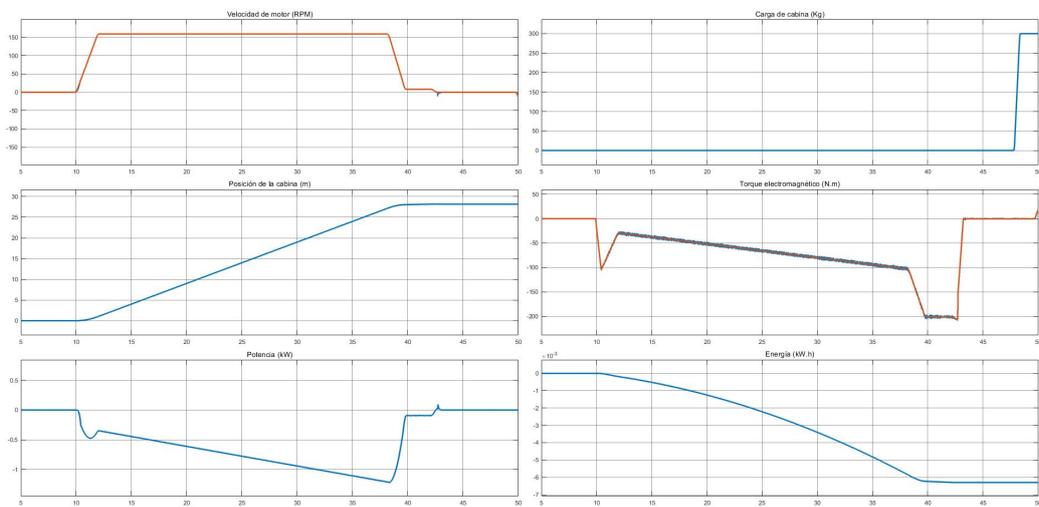


Figura 8.19: Variables de interés para  $T_s = 0,5\mu s$ .

## 8.2. Interfaz gráfica

La idea básica detrás de la interfaz gráfica es poder permitirle al usuario ingresar de manera sencilla los parámetros que simularán un ascensor cualquiera. *GUI* (*Graphical User Interfaces* por sus siglas en inglés), es una herramienta de

## 8.2. Interfaz gráfica

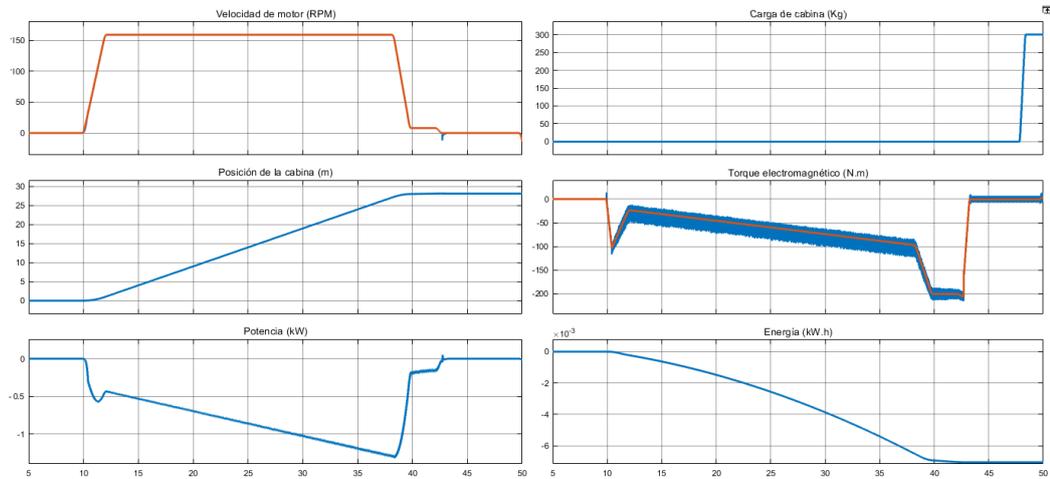


Figura 8.20: Variables de interés para  $T_s = 20\mu s$ .

*Matlab* que permite controlar de manera dinámica, con el uso de menús, barras y controles deslizantes, distintas aplicaciones de *Matlab* diseñadas.

En esta sección se presenta una guía descriptiva e ilustrativa de la interfaz gráfica realizada por el grupo RegEnerA.

### 8.2.1. Guía de Instalación

Para poder utilizar correctamente la interfaz diseñada, deberá tener instalado el software *Matlab* versión R2017a en adelante en su ordenador. Para adquirir la licencia de Matlab puede acceder al siguiente link (<https://la.mathworks.com/pricing-licensing.html>).

1. Visite la página web para descargar el archivo comprimido RegEnerA (<https://bit.ly/3A82Znj>) o escanee el código QR que se muestra a continuación:

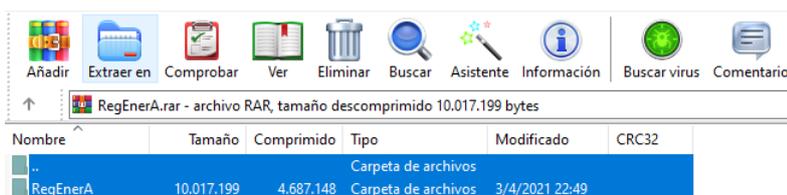


2. Haga click izquierdo en el ícono de descarga que se muestra arriba a la derecha, y descargue el archivo comprimido “RegEnerA” de extensión .rar.



## Capítulo 8. Simulación

3. Descomprima el archivo .rar con el programa *WinRAR* o similar. Puede descargar la herramienta de manera gratuita en el siguiente link (<https://www.winrar.es/descargas>). Para ello deberá seleccionar la carpeta *RegEnerA* y hacer un click izquierdo sobre el icono que dice “*Extraer en*” arriba a la izquierda, y extraer la carpeta en la dirección que desee.



4. Una vez que la extracción esté completa, usted está listo para configurar la interfaz gráfica.

### 8.2.2. Configuración

Un paso previo a empezar a simular, es configurar las características del edificio. Para ello, se deberá completar las planillas de cálculo que se encuentran en el archivo Excel de nombre *Viajes a simular*. El archivo se encuentra dentro de la carpeta *RegEnerA* previamente descargada.

Use la tabla que se muestra a continuación para rellenar las celdas en la hoja de cálculo “*Inicialización de Parámetros*”.

Celda	Parámetro	Rango	Comentario
C5	Número de piso más bajo	-2 ... 99	Usualmente indica planta baja o subsuelo.
C6	Número de piso más alto	-2 ... 99	
C14	Aceleración	0 ... 5 m/s <sup>2</sup>	Valor de la aceleración de la cabina al arranque.
C15	Desaceleración	-5 ... 0 m/s <sup>2</sup>	Valor de la desaceleración de la cabina al frenar.
C16	Velocidad de régimen	0 ... 5 m/s	Velocidad del ascensor en régimen.
C19	Velocidad de nivelación	0 ... 5 m/s	Velocidad para nivelar al ascensor.
C20	Tiempo de nivelación	0 ... 10 s	Tiempo del ascensor con velocidad de nivelación.
C21	Tiempo de frenado	0 ... 10 s	Tiempo que demora el ascensor en frenar.
C23	Error	0 ... 0.8 m	Máximo error admisible.

La fila 9 de la planilla Excel se usará para indicar las distancias entre pisos consecutivos en el edificio. La celda **C9** tendrá el valor en metros de la distancia

entre el piso más bajo del edificio (indicado en **C5**) y el piso siguiente. La celda **E9** tendrá la siguiente distancia, y así consecutivamente a lo largo de la fila 9 hasta llegar a la distancia entre el ante-último piso y el último piso indicado en **C6**.

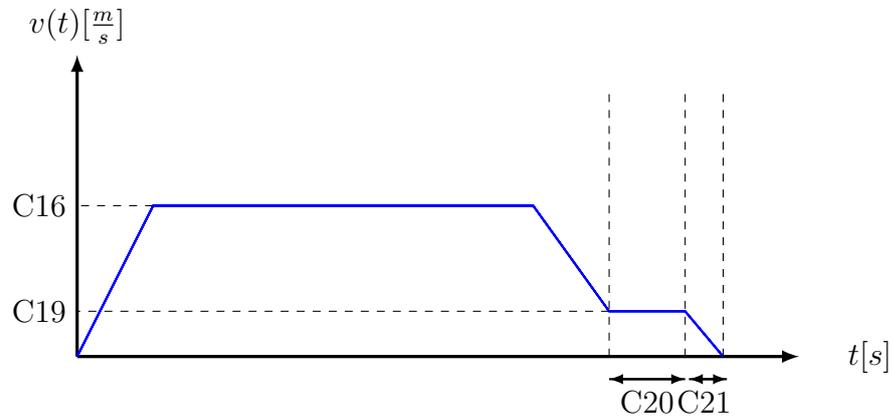


Figura 8.21: Curva simplificada de velocidad del Ascensor.

### 8.2.3. Viajes a Simular

Los viajes a simular se deben ingresar en la hoja de cálculo *Viajes a Simular* del mismo archivo Excel. Aquí se deben tomar dos precauciones:

1. El primer viaje, por defecto, parte desde planta baja (piso 0). Esto implica que si en la primer celda de viaje usted ingresa el piso 7, el viaje correspondiente es de 0 a 7.
2. El primer viaje, por defecto, siempre es con carga nula.

Una casilla de mensajes le mostrará los errores para que usted pueda corregirlos.

- Si los pisos ingresados están dentro del rango de pisos que ingresó como mínimo y máximo, un mensaje aparecerá indicando:

Los pisos ingresados se encuentran en el rango de pisos del edificio

- Si algún piso ingresado no está dentro del rango de pisos que ingresó como mínimo y máximo, un mensaje aparecerá indicando:

Error, se superó el piso máximo o el piso mínimo del edificio

Usted deberá modificar todas aquellas celdas que aparecen en color rojo.

- Si usted ingresó como primer piso el piso 0, un mensaje dirá:

Error, el primer viaje no puede ser al piso 0

## Capítulo 8. Simulación

- Si usted ingresa dos pisos consecutivos iguales, un error aparecerá indicando:

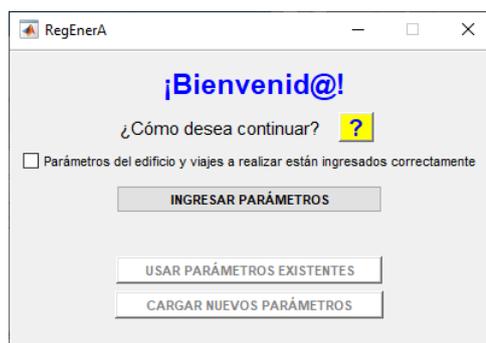
Error, viajes consecutivos van al mismo piso

Al abrir por primera vez el archivo *Viajes a Simular*, las celdas estarán completas a modo de ejemplo. En todo momento usted podrá editar esos valores de acuerdo a las condiciones de su edificio y los viajes que quiera simular.

### 8.2.4. Guía de Uso

IMPORTANTE: Para poder ejecutar correctamente la simulación, usted debe asegurarse de haber seguido los pasos indicados en la Guía de Instalación y en la Configuración.

1. Abrir el software *Matlab*.
2. Abrir el archivo *RegEnerA.m* que se encuentra en la carpeta RegEnerA.
3. Correr el archivo. Una vez finalizado se abrirá un cuadro de diálogos dándole la bienvenida. El símbolo **?** le dará una ayuda para ingresar los parámetros.



4. Si usted completó las planillas de Excel como se describió en Configuración, marcar “Parámetros del edificio y viajes a realizar están ingresados correctamente”. De lo contrario, usted deberá hacer click en **INGRESAR PARÁMETROS** para completar la planilla.
5. Una vez marcada la opción de parámetros completados, usted deberá elegir entre dos opciones:
  1. Hacer click en **USAR PARÁMETROS EXISTENTES** si usted desea simular un edificio cuyos parámetros han sido cargados previamente.
  2. Hacer click en **CARGAR NUEVOS PARÁMETROS** si usted modificó los parámetros del edificio en la planilla Excel.

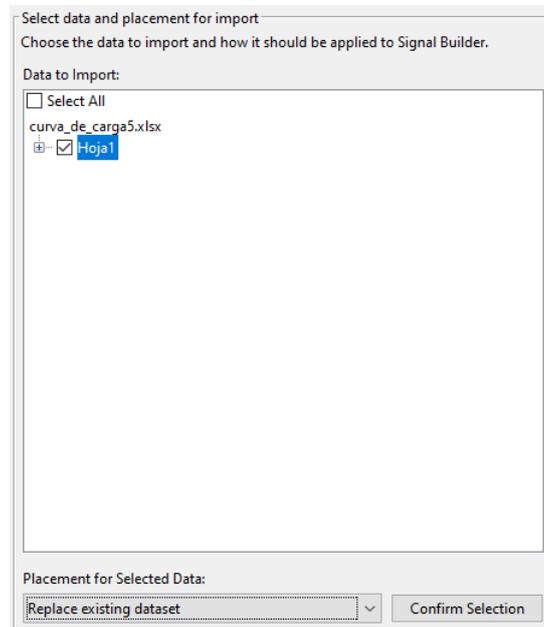
## 8.2. Interfaz gráfica

Una vez que el edificio está listo para simularse, se abrirá una interfaz paramétrica.



6. Presionar el botón **EJECUTAR** para abrir el entorno de *Simulink*. Se generarán dos curvas: “curva de carga” y “velocidad de referencia” que se deberán importar de manera simultánea en el generador de señal *Signal Builder*.
  - a) Para importar las curvas de entrada, hacer click en **File** → **Import from File** → **Browse...** y elija el archivo “señales\_de\_entrada”.
  - b) En la sección “Data to Import” seleccione **Hoja1**.
  - c) En la sección “Placement for Selected Data” seleccione **Replace existing dataset**.
  - d) Seleccione **Confirm Selection** → **Apply** → **Ok**.

## Capítulo 8. Simulación



7. Haciendo uso de las barras a la izquierda de la interfaz, usted podrá modificar los distintos parámetros. Usted podrá utilizar los predeterminados o ingresar sus propios parámetros. Deberá hacer click en **APLICAR** para que se apliquen los cambios.

Parámetros Eléctricos		
$R_s$	Resistencia estatórica	$\Omega$
$L_{sd}$	Reactancia de eje directo	mHy
$L_{sq}$	Reactancia de eje en cuadratura	mHy
Parámetros Mecánicos		
J	Inercia del motor	kg.m <sup>2</sup>
p	Pares de polos del motor	-
Fr	Factor de fricción	N.m.s

## 8.2. Interfaz gráfica

DC Bus		
R	Resistencia de frenado	$\Omega$
C	Contensador DC	$\mu\text{F}$
Act. Voltage	Voltaje de activación	V
Shut. Voltage	Voltaje de apagado	V
Control Vectorial		
1	Flujo constante	-
2	Tensión constante	-
3	Torque constante	-
Sistema Mecánico		
r	Radio polea	m
Mp	Masa de polea	kg
Mc	Masa de la cabina	kg
Mw	Masa del contrapeso	kg
$\lambda$	Densidad del cable	kg/m
Nc	Número de cables	-
$V_n$	Velocidad nominal	rpm

8. Una vez ingresados los parámetros, hacer click en **START** para simular los viajes que se ingresaron previamente. Se abrirá un osciloscopio virtual para que pueda observar la velocidad del motor (rpm), posición de la cabina (m), carga de la cabina (kg), torque electromagnético (Nm), potencia (W) y energía consumida (Ws).



9. En todo momento usted puede pausar la simulación y luego continuarla con los botones **PAUSE** y **CONTINUE** o parar la simulación con el botón **STOP**.
10. Al finalizar debe guardar los cambios hechos si desea que estos se hagan permanentes la próxima vez que desee simular.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 9

## Marco legal sobre microgeneración

En el presente capítulo, se enmarca en el texto todo lo referido a las leyes nacionales e internacionales que regulan a los dispositivos regenerativos. Se presenta al microgenerador, el cual es el encargado de intercambiar energía en forma bidireccional con la red de Distribución, y se destacan los aspectos procedimentales para su gestión.

### 9.1. Normas uruguayas

El marco legal en Uruguay se basa en las directivas marcadas por el Decreto del Poder Ejecutivo N° 173/010, promulgado el 1/6/2010 [13]. El mismo autoriza a todos los suscriptores que estén conectados a la red de distribución de baja tensión a instalar generación de origen renovable (*Artículo 1*).

A continuación se hacen algunas definiciones útiles para el entendimiento de la presente sección.

**Definición 1. Instalación de microgeneración (IMG):** Instalación que dispone de un equipamiento que convierte energía de fuentes renovables en energía eléctrica.

**Definición 2. Fuentes renovables:** Fuentes de generación provenientes de recursos eólico, solar, biomasa o mini-hidráulica.

**Definición 3. Punto de conexión y medida:** Punto físico en el cual el cliente que cuenta con un sistema de microgeneración se conecta a la red de baja tensión de UTE, y donde se encuentra el puesto de medida y control.

El microgenerador podrá intercambiar energía en forma bidireccional con la red de Distribución, y será UTE quien se encargue de la compra de toda la energía que el microgenerador entregue a la red (*Artículo 2*). Además, UTE será quien le proporcione el acceso al usuario al *Convenio de Conexión*, el cual cumple las condiciones determinadas por el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM).

En la Tabla 9.1 se establecen los valores límites impuestos al microgenerador para los equipamientos instalados.

## Capítulo 9. Marco legal sobre microgeneración

Normativa uruguaya		
$I_{max}$ en régimen	16 A	Monofásico
$I_{max}$ en régimen	25 A	Monofásico con retorno por tierra
$P_{max}$ nominal	P contratada	-

Tabla 9.1: Resumen - valores límites para equipamientos a instalar para microgeneración.

Toda la energía que compre UTE al microgenerador, lo hará de acuerdo al precio del cargo por energía que se encuentra en el pliego tarifario de UTE (*Artículo 4*), con la excepción de la tarifa residencial simple cuya primer franja se sustituye por la franja superior inmediata.

El lector si lo desea puede acceder de manera pública al pliego tarifario de UTE mediante el siguiente link:

→ <https://www.ute.com.uy/clientes/mi-factura/precios-actuales>.

Quien desee realizar dicho intercambio de energía con la red de Distribución, no deberá pagar cargos por el uso de las redes eléctricas (*Artículo 6*). Sin embargo, todo equipamiento que se necesite en las instalaciones interiores para la conexión a la red de baja tensión estará a cargo del microgenerador (*Artículo 7*). En caso de ser necesario cualquier acondicionamiento del gabinete para alojar nuevos equipos, este también será el responsable.

Para la obtención de un medidor adecuado a esta modalidad de intercambio de energía, UTE se encargará de proponer al Poder Ejecutivo una tasa de conexión (*Artículo 8*). Todos los costos de energía asociados a esta forma de contratación se incluirán en el cálculo de tarifas de UTE (*Artículo 11*).

Se establece, de acuerdo a las características de la red eléctrica, la máxima potencia autorizada para la instalación de microgeneración. La Tabla 9.2 muestra los valores permitidos para la máxima potencia activa que se autoriza al microgenerador a inyectar en la red de distribución de baja tensión a través del punto de conexión y medida.

Normativa para IMG	
Tensión nominal (V)	P máxima de IMG (kW)
230 trifásico	100
400 trifásico	150

Tabla 9.2: Máxima potencia autorizada de IMG.

## 9.2. Normas internacionales

Con el fin de evitar emprendimientos de microgeneración que prioricen la venta de energía, en lugar de destinarla al autoconsumo, y considerando que la generación para autoconsumo conlleva grandes beneficios para la economía y el medioambiente, el MIEM resolvió el 12 de mayo de 2017, [12] el agregado de ciertos lineamientos.

Entre ellos, el MIEM establece que la energía eléctrica anual que se inyecte no puede superar al consumo anual de energía eléctrica tomada de la red. Su incumplimiento llevará a penalidades, pudiéndose llegar a la rescisión unilateral del contrato. Además, al momento de solicitar la instalación de microgeneración, UTE deberá verificar que la generación estimada anual sea menor o igual a la energía consumida por el suscriptor de manera anual, considerando los consumos históricos.

La normativa actual no tiene presente de manera textual al sistema de regeneración de energía a tratar en este proyecto, considerando que este no es estrictamente un mecanismo de obtención de energía a partir de fuentes renovables. Sin embargo, sí es considerado un mecanismo *eco-friendly*, el cual no genera contaminación ni demás perjuicios semejantes.

La no inclusión textual en la normativa vigente implica que no se puede realizar dicha implementación, si la misma implica un intercambio bidireccional con la red. Sería, por tanto, muy interesante explorar posibilidades de ampliar los reglamentos, para así incluir dichos dispositivos en el margen legal, brindando así un abanico de posibilidades mayor en lo que refiere a la regeneración de energía.

También ha de considerarse que de ninguna manera estos sistemas podrán generar mayor cantidad de energía de la que consumen, dado que su función es la de recuperar energía, que de otro modo se perdería, haciendo que en términos globales, el consumo desde la red se vea aminorado. Esto juega un papel muy importante si se habla de eficiencia energética, ya que si no se realiza esta implementación del driver regenerativo, la energía que el motor genera simplemente se disipa en una resistencia.

## 9.2. Normas internacionales

Como referencia internacional, se cuenta con la directiva del Parlamento Europeo, que insta a los países miembros de la Unión Europea a reglamentar sus mercados eléctricos, conforme a los cambios tecnológicos y a los objetivos medioambientales que se plantean.

La Directiva (UE) 2019/944 revisa y sustituye la Directiva 2009/72/CE y está en vigor desde el 1 de enero de 2021 [9]. La misma tiene su justificativo en que los consumidores juegan un papel fundamental en el alcance para adaptar el sistema eléctrico a la generación de electricidad renovable. La Unión Europea reconoce la competencia entre mercados para la satisfacción de las necesidades de los consumidores, a los cuales capacita y dota de herramientas necesarias para que estos sean participantes activos en el mercado de la energía eléctrica [5].

## Capítulo 9. Marco legal sobre microgeneración

Todos los consumidores deben poder beneficiarse de su participación en el mercado de energía, a modo de incentivo (*Artículo 37*). Estos deben poder consumir, almacenar y/o vender la electricidad autoregenerada en el mercado, y participar en todos los mercados de almacenamiento de energía (*Artículo 42*) [6].

A partir de estos artículos de la directiva, puede desprenderse que lo que se está tratando de hacer es diversificar el mercado eléctrico, flexibilizando el ingreso de los usuarios finales en la generación para autoconsumo, almacenamiento y/o venta de energía eléctrica.

Al permitir esto, lo que se quiere lograr es involucrar todos los avances tecnológicos en cuanto a energías renovables, dado que son los mecanismos idóneos para que los consumidores finales puedan participar. Esto trae consigo objetivos medioambientales más importantes, ya que al involucrar mayores cantidades de energías renovables se disminuyen las energías fósiles, evitando contaminar el ambiente.

La directiva internacional apunta hacia un sistema eléctrico más inteligente y flexible, que involucre aspectos tales como la eficiencia energética o la “respuesta de demanda”. Esto refiere a tener un comportamiento frente al consumo energético que dependa del resto del sistema, poniendo en juego también las variables económicas, como la disponibilidad de recursos energéticos.

Analizando las normativas nacionales e internacionales, se puede ver que las normas europeas permiten mayores posibilidades a los consumidores finales. Algo que para nada es despreciable, es la posibilidad de vender energía eléctrica proveniente de fuentes renovables, además de poder almacenarla e inyectarla en momentos de mayor demanda, logrando mejorar los beneficios del intercambio.

Lo mencionado en el párrafo anterior podría ser muy bueno si se piensa en los drivers de regeneración, dado que impulsaría la introducción masiva de dichos dispositivos en el mercado local, siempre que se brinden algunos beneficios o incentivos económicos para su amortización.

Para profundizar en estos temas puede remitirse al Anexo A.

# Capítulo 10

## Análisis de las medidas

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos en la campaña de medición. Se analizan los datos recabados y procesados en los tres edificios, los dos residenciales y el de oficinas. Esto permitirá realizar un análisis profundo del uso del ascensor y la posible energía a regenerar.

### 10.1. Uso del ascensor

Para determinar el uso diario medio del ascensor, se promediaron la cantidad de viajes por día, separándolos en franjas horarias. De esta manera se puede ver cuál es la tendencia horaria, por día, de los viajes del ascensor de cada edificio.

La Figura 10.1 muestra la comparación entre el edificio #1 y #3 del uso diario promedio del ascensor. Vale aclarar que ambos edificios son de tipo residencial, y que las medidas del #1 fueron realizadas en el mes de octubre, mientras que las del #3 en enero. Los resultados mostrados fueron normalizados en base a la cantidad promedio de viajes realizados en cada edificación.

Una primera observación que refleja la gráfica de uso diario, es que la mayor cantidad de viajes se concentra en el horario del mediodía (12 a 15 horas), cuando los integrantes del núcleo familiar regresan a sus hogares para el almuerzo, o salen de sus hogares para hacer las compras.

Un porcentaje similar e igual de importante se da en la franja de 17 a 24 horas, cuando termina la jornada laboral y es hora de volver al domicilio para finalizar el día.

Estas tendencias se repiten en ambos edificios residenciales, y para la totalidad de las muestras tomadas. Surge entonces la necesidad de ver cómo es el panorama diario entre semanas para poder realizar un análisis más completo

La Figura 10.2 muestra el uso promedio semanal del ascensor; en este caso se contemplan solamente las medidas en el edificio #3. Se visualiza que la cantidad de viajes diarios ronda los 350 viajes promedio, con picos de un poco más de 400 viajes.

## Capítulo 10. Análisis de las medidas

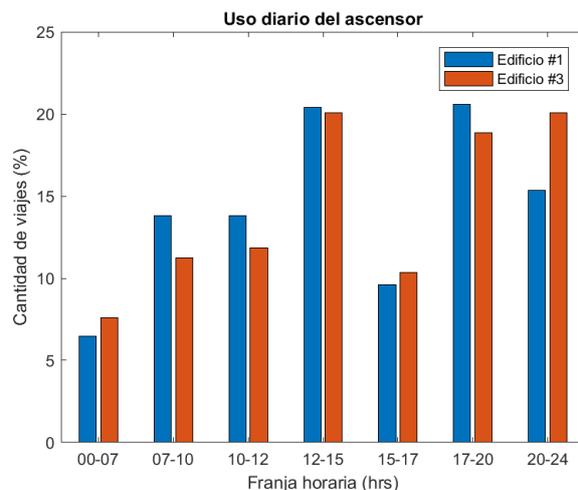


Figura 10.1: Gráfica: Uso diario promedio del ascensor.

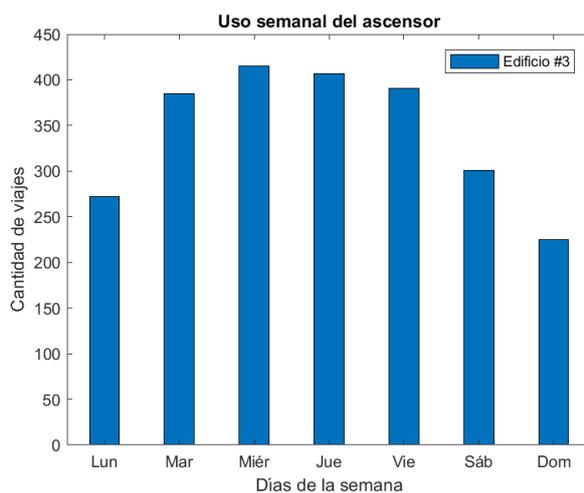


Figura 10.2: Gráfica: Uso semanal promedio del ascensor.

La situación de la gráfica de uso semanal deja en evidencia que el flujo de habitantes utilizando el ascensor en el edificio residencial #3 es mayor los días de semana, entre martes y viernes. Hay una cantidad significativamente menor en los días que van del sábado al lunes. Esta merma en la cantidad de viajes los fines de semana se mantuvo en todos los datos recabados.

Para ir más a fondo, se desglosan los viajes semanales entre los días con menos viajes (fin de semana) del resto. En la Figura 10.3 se compara el uso diario del ascensor los días de semana junto con los fines de semana en el edificio #3.

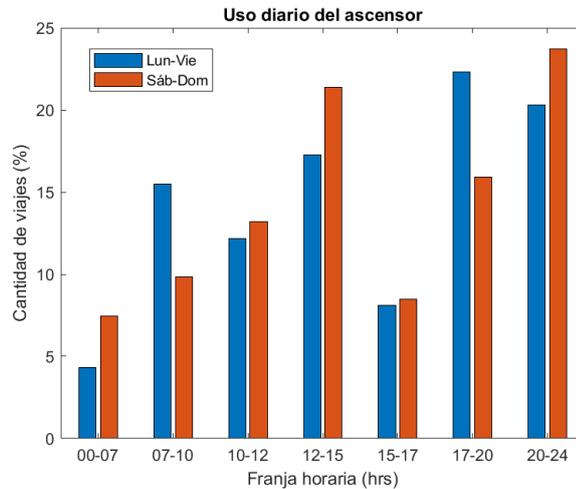


Figura 10.3: Gráfica: Uso semanal promedio del ascensor - días hábiles vs. fin de semana.

En un primer vistazo, se puede destacar que la diferencia entre los días hábiles con respecto a los fines de semana está dada por el hecho de que los residentes no deben salir de sus casas para ir a trabajar. Esto se ve ya que en los horarios de comienzo o finalización de la jornada laboral, los viajes de fin de semana se ven reducidos.

Sería interesante poder comparar el uso del ascensor en edificios residenciales con los ascensores instalados en edificios de oficinas. Lamentablemente, la cantidad de datos recabados en el edificio #2 no fue suficiente como para realizar un análisis estadístico.

Para poder zanjar este inconveniente, se realizó una encuesta virtual a 500 individuos. Una de las preguntas de la encuesta fue *¿Con qué frecuencia al día utiliza el ascensor?*

La encuesta repetía esta pregunta haciendo diferencia entre si era edificio de oficinas o residenciales. El primer caso tuvo 292 respuestas, y el segundo 385. Los resultados se exponen a continuación.

En primera instancia se aprecia que hay una inclinación por los edificios residenciales a tener personas que utilizan el ascensor gran cantidad de veces. El 15% admitió utilizar el ascensor más de 6 veces por día en el caso de oficinas, mientras que este valor es el doble (30%) en residenciales.

Este último resultado es interesante ya que para edificios con igual cantidad de personas, los edificios residenciales presentarán una mayor cantidad de viajes diarios que los edificios de oficinas, por tanto, una mayor regeneración de energía eléctrica.

## Capítulo 10. Análisis de las medidas

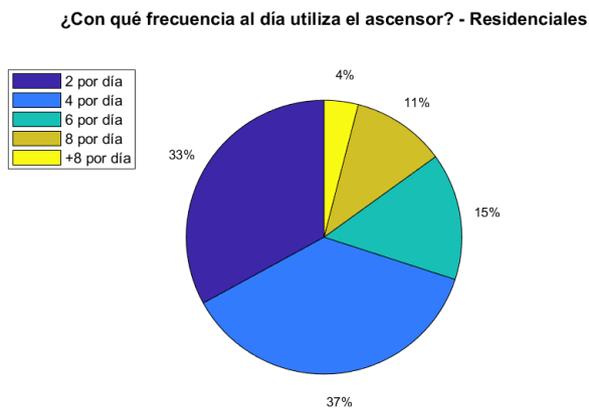


Figura 10.4: Gráfica: respuesta a la pregunta *¿Con qué frecuencia al día utiliza el ascensor? - Residenciales.*

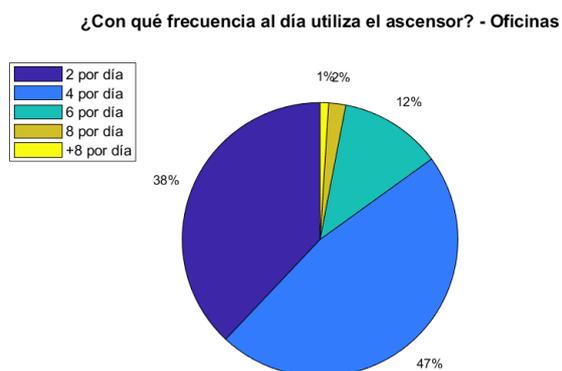


Figura 10.5: Gráfica: respuesta a la pregunta *¿Con qué frecuencia al día utiliza el ascensor? - Oficinas.*

Si se considera un edificio con 90 habitantes aproximadamente como lo es el edificio #3, los datos de la Figura 10.4 representan un total de viajes diarios promedio ( $\bar{V}$ ) dado por la siguiente igualdad:

$$\bar{V} = \frac{90}{100} (2 \times 33 + 4 \times 37 + 6 \times 15 + 8 \times 11) = 353 \quad (10.1)$$

Este resultado es consistente con la cantidad promedio de viajes que muestra la Figura 10.2, validando aún más los datos recabados.

## 10.2. Carga del ascensor

Al momento de estudiar la energía consumida en los ascensores, es esencial determinar la carga que este maneja. En las Figuras 10.6 y 10.7 se ven las cargas promedio en los días hábiles y fines de semana respectivamente. Las medidas corresponden al edificio #3 en el mes de febrero.

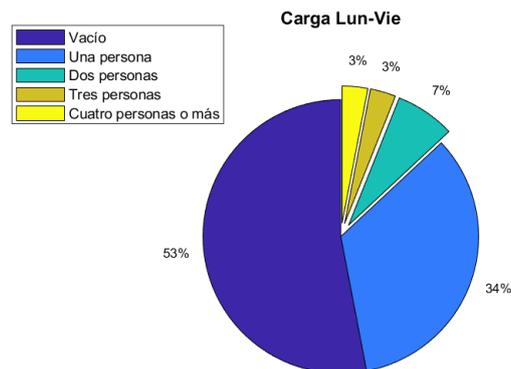


Figura 10.6: Gráfica: Carga promedio semanal del ascensor - Días de semana.

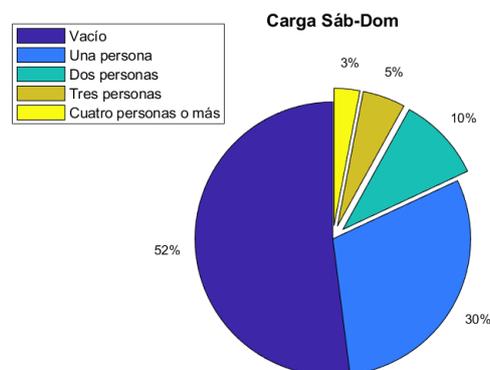


Figura 10.7: Gráfica: Carga promedio semanal del ascensor - Fines de semana.

La tendencia de la carga del ascensor los días hábiles se replica en los fines de semana. No hay que perder de vista que las medidas se realizaron en pleno auge de la pandemia por COVID-19, y por normativas sanitarias se redujo la cantidad de personas permitidas en un ascensor. Aún así, todo indica que la mayoría de los viajes son vacíos o con una sola persona.

## Capítulo 10. Análisis de las medidas

Analizar la carga del ascensor por sí sola no es muy significativo a la hora de ver si en el viaje se puede regenerar o no energía eléctrica. Para ello es importante ver los pisos por los que se desplaza el ascensor con esa carga.

En una primera instancia, se muestra la concurrencia porcentual a los distintos pisos del edificio #3 (ver Figura 10.8). Se recuerda que este tiene 11 pisos, incluidos planta baja, subsuelo y terraza.

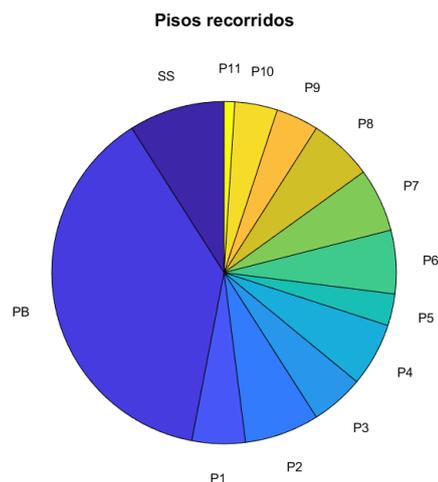


Figura 10.8: Gráfica: Pisos recorridos.

Las medidas en este edificio residencial durante el mes de febrero revelan que, como es de esperar, los pisos más visitados son planta baja y subsuelo, siendo planta baja por lejos el más concurrido. Los pisos con apartamentos tienen una concurrencia prácticamente equitativa, y es el piso 11 (terracea) el que menos cantidad de visitas tiene.

Estos resultados son muy importantes, ya que muestran que un gran porcentaje de los viajes son a planta baja o subsuelo, lo que implica que el ascensor, con gran frecuencia, desciende, y de acuerdo a las Figuras 10.6 y 10.7 la mayoría son vacíos o con una persona. Esto implica una gran cantidad de viajes donde no hay presencia de energía regenerada.

Por contrapartida, los viajes a niveles con apartamentos son más de la mitad. Haciendo nuevamente uso de que la mayoría de los viajes son vacíos o con a lo sumo una persona, tenemos otra cantidad importante de viajes donde sí hay presencia de energía regenerada.

Para corroborar la consistencia de los datos, se los comparará con los obtenidos en el mes de marzo. Se visibilizaron algunas diferencias, como se ve en la Figura 10.9. La cantidad promedio de viajes diarios en el mes de marzo tuvo un giro drástico: ahora son los días sábado, domingo y lunes donde más viajes se produjeron.

### 10.3. Resultados energéticos

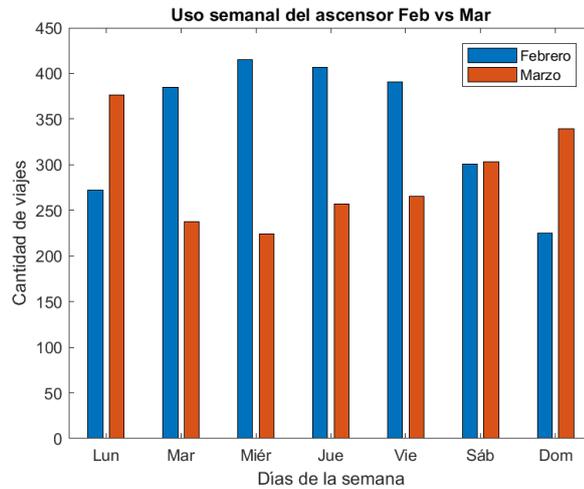


Figura 10.9: Gráfica: Cantidad de viajes diarios Febrero vs. Marzo.

Lo primero a destacar es que la cantidad promedio de viajes en la semana se mantiene en el rango de los 250 a 400 viajes diarios, aún habiéndose distribuido de manera distinta en febrero y marzo.

En el mes de marzo Uruguay comenzaba a sentir los efectos de la segunda ola de COVID-19, instando por teletrabajo cada vez más. Esto sin dudas influyó en la cantidad de viajes entre semana, ya que los residentes permanecían en sus casas.

En cuanto a la carga del ascensor, la misma respetó la tendencia de febrero, coherente con las medidas sanitarias de reducción de pasajeros en ascensores (ver Figura 10.10).

Como conclusión de los datos registrados, se puede afirmar que un poco más de la mitad de los viajes son realizados sin carga, y la mayoría (más del 80 %) son viajes con no más de una persona.

Si al párrafo anterior le agregamos que casi la mitad de los viajes van a los pisos habitados por los residentes del edificio, podemos encontrar gran cantidad de momentos diarios donde el edificio estará regenerando energía eléctrica.

En caso de edificios con oficinas, hay una leve tendencia a una menor regeneración de energía que en edificios con residencias. Esto debido a que la frecuencia relativa del uso del ascensor diario en edificios de oficinas es menor.

### 10.3. Resultados energéticos

A partir de los valores de consumo de potencia registrados durante las mediciones, es posible estudiar qué cantidad de energía se podría recuperar para cada mes estudiado.

En la Tabla 10.1 se presentan los resultados obtenidos, para cada mes que

## Capítulo 10. Análisis de las medidas

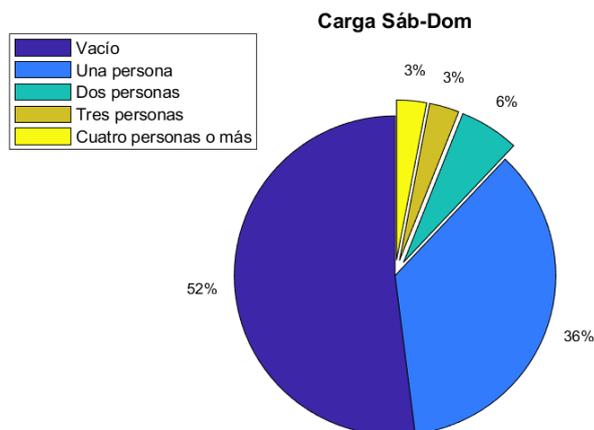


Figura 10.10: Gráfica: Carga promedio en Marzo.

se midió en los distintos edificios. Se debe hacer notar que existe una diferencia entre la energía regenerada, y la energía regenerable. Esta última es la que se logró medir, y corresponde a la energía que se puede obtener del sistema. La que debe ser convertida por el convertidor regenerativo, por lo cual entrará en juego su eficiencia.

En términos matemáticos:

$$E_{regenerada} = \eta \cdot E_{regenerable}$$

Donde  $\eta$  representa la eficiencia del convertidor, la que ronda el 94 %.

Mes	Edificio	E consumida (kWh)	E regenerable (kWh)	%
Octubre	#1	62,4	11,7	18,9
Enero	#3	23,0	10,8	47,1
Febrero	#3	34,9	17,4	49,9
Marzo	#3	32,2	15,1	47,0

Tabla 10.1: Resultados energéticos.

Si bien en febrero se alcanza un valor muy cercano a 50 % de energía regenerable, no es realista considerar este valor de energía como la cantidad que se podría recuperar. Debido a que mismo resulta muy optimista.

Tomando el promedio de los datos recabados, se concluye que la capacidad de regenerar energía eléctrica ronda el 48 % para el Edificio #3, y 19 % para el Edificio #1, una diferencia importante, que tiene su origen en las pérdidas, que se constataron mayores para el primer edificio.

### 10.3. Resultados energéticos

Además de la energía regenerada, hay otro factor que puede llegar a mejorar el resultado económico de la instalación; este es la utilización de las tarifas inteligentes. Dado que se cuenta con información del uso diario del ascensor, tanto en días hábiles como en fines de semana, es posible determinar franjas horarias para reducir el consumo energético, cuando sea posible, con ayuda de estas tarifas.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 11

## Estimación del consumo energético

Este capítulo tiene como objetivo presentar las medidas procesadas, realizando estimativos representativos que den una respuesta a diferentes escenarios de consumo energético.

Se deben tomar los resultados de las mediciones como referencia en cuanto al uso del ascensor y su carga, contemplando sus variaciones y patrones. Esto en conjunto con la simulación, servirá para llevar a cabo el estudio energético, dotando al usuario de una herramienta lo suficientemente ágil y precisa como para poder determinar si resulta conveniente (o no) la implementación de sistemas regenerativos.

### 11.1. Matriz de energías

Una primera aproximación a la cantidad de energía que consume una edificación por el uso del ascensor, viene dada por la cantidad de viajes que realiza diariamente, y la energía consumida en cada uno.

Un buen estimativo consiste en crear una matriz de energías donde cada elemento contiene la energía de un viaje posible en ascensor, y donde existen tantos elementos de la matriz como viajes posibles en el edificio. Estos datos de energía se obtendrán de la simulación.

Para tener en cuenta las diferentes cargas, se disponen 4 matrices denominadas  $\mathbf{E}^0$ ,  $\mathbf{E}^1$ ,  $\mathbf{E}^2$  y  $\mathbf{E}^3$  para viajes vacíos, con una, dos, o tres personas respectivamente. No se contemplarán viajes con más personas dado que, como se puede corroborar en la sección anterior, estos equivalen a menos del 3% de los viajes.

El procedimiento para crear la matriz de energías consta de algunos supuestos:

- La energía consumida para subir la cabina  $x$  cantidad de pisos es independiente del piso de partida.
- La energía consumida para bajar  $x$  cantidad de pisos es independientemente del piso de partida.

## Capítulo 11. Estimación del consumo energético

- En caso de contarse con subsuelo, la energía consumida para llevar la cabina desde subsuelo hasta planta baja es igual a la energía requerida para llevar la cabina desde planta baja al primer piso.
- En caso de contarse con subsuelo, la energía consumida para llevar la cabina desde planta baja hasta subsuelo es igual a la energía requerida para llevar la cabina desde el primer piso hasta planta baja.

A partir de estas suposiciones, se estiman las energías que consume cada viaje con ayuda de la simulación. Se realiza un ensayo con la cabina recorriendo todos los pisos desde planta baja, ida y vuelta, para cada configuración de carga.

A continuación se presenta un ejemplo de este ensayo, realizado para el Edificio #1 (ver Figura 11.1 y Figura 11.2).

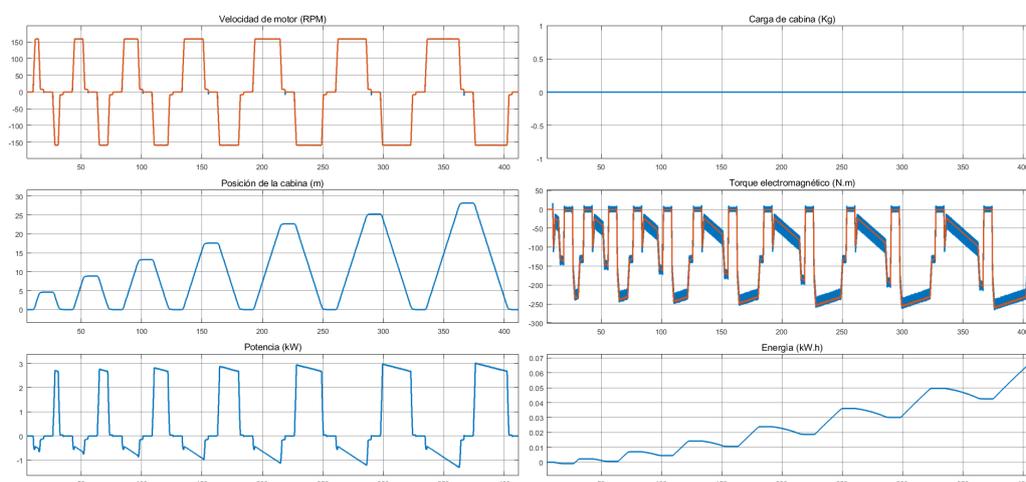


Figura 11.1: Resultado del ensayo simulado sin carga - Edificio #1.

La matriz de energía se construye ubicando en el elemento  $(i, j)$  la energía consumida  $e_{ij}$  correspondiente al viaje de origen  $i$  y destino  $j$ , para todo  $i$  y  $j$  comenzando desde el piso más bajo al más alto.

Si la edificación no cuenta con subsuelo, la matriz comenzará con la columna correspondiente a planta baja para los pisos de llegada, y con la fila correspondiente también a planta baja para los pisos de partida. Esta distinción se realiza de forma automática por el programa **matrizEnergía**, el cual solicitará ingresar «y» si se desea contar con subsuelo; en caso contrario se deberá ingresar «n».

La matriz de energías  $\mathbf{E}^k$ , tiene la propiedad de que su diagonal principal es nula; sus diagonales inferiores son positivas y de igual valor, crecientes al acercarse al vértice inferior izquierdo. Algo similar ocurre con sus diagonales superiores, con la diferencia de que estas son de valor negativo y decrecientes al acercarse al vértice superior derecho.

## 11.2. Análisis de viajes y cargas

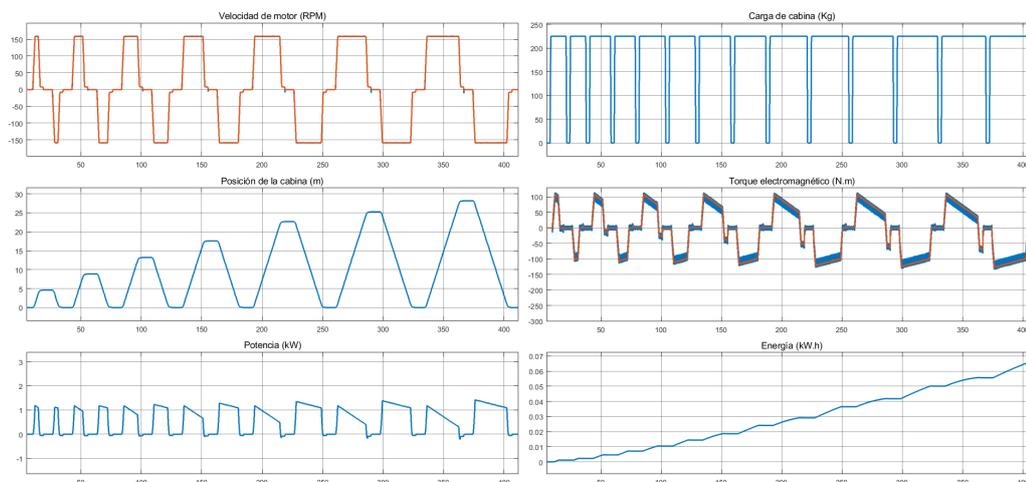


Figura 11.2: Resultado del ensayo simulado con tres personas - Edificio #1.

Este hecho no es más que una demostración de que el sistema consume energía en la medida que al estar la cabina vacía, bajarla implica para el motor aportar energía para aumentar la energía potencial del sistema. En cambio, al subir la cabina, el motor recibe dicha energía potencial, transformándola en energía eléctrica.

## 11.2. Análisis de viajes y cargas

La información que proporciona la matriz de energías por sí sola no es suficiente. Se necesitan estimativos de viajes y cargas que representen fielmente la realidad. Se define entonces la distribución de cargas como en la Tabla 11.1. Dicha distribución viene de promediar los datos recabados en la campaña de mediciones.

Distribución de cargas				
Personas	0	1	2	3
Probabilidad	0,51	0,37	0,08	0,04

Tabla 11.1: Distribución de cargas.

Dicha tabla representa la probabilidad de que un viaje en ascensor tenga  $p$  personas. Como se mencionó anteriormente, la mayor cantidad de viajes son vacíos o con una sola persona.

De la misma manera que se definió la distribución de cargas, se hizo con los viajes posibles. Para ello, se utilizaron los datos de concurrencia de los pisos del edificio, y se definió la distribución de la siguiente manera:

- De existir un subsuelo, la probabilidad de ir al mismo será de 9%

## Capítulo 11. Estimación del consumo energético

- La probabilidad de ir a planta baja ( $P_{PB}$ ), sumada a la probabilidad de ir al subsuelo ( $P_{SS}$ ) es igual al 47 %.
- La probabilidad de ir a terraza ( $P_T$ ), si existiese, es del 1 %.
- La concurrencia a los pisos intermedios (PI) es equiprobable.

Estas premisas vienen de la experiencia en los distintos edificios estudiados. En la Tabla 11.2 se resume lo antes dicho. En este caso se denominó como  $N$  a la cantidad de pisos intermedios.

Distribución de pisos				
Piso	SS + PB	SS	PI	T
Probabilidad	0.47	0.09	$\frac{1-(SS+PB+T)}{N}$	0.01

Tabla 11.2: Distribución de pisos.

Para el caso del Edificio #1 (de tipo residencial), la distribución de pisos es la presentada en la Tabla 11.3. Cada piso intermedio tiene una probabilidad de concurrencia del 8,7 %.

Distribución de pisos				
Piso	PB	SS	PI	T
Probabilidad	0.38	0.09	0.087	0.01

Tabla 11.3: Distribución de pisos.

A partir de las matrices generadas por el programa creado en MatLab **matrizEnergía**, es posible combinar su información con las distribuciones de cargas y pisos recorridos en las mediciones. Así, se pueden generar distintos viajes, y cuantificar el consumo energético del mismo a partir de resultados empíricos.

Una vez hechos los ajustes anteriores, se hace uso del programa creado también en MatLab, **calculoEnergía**. El mismo solicita ingresar la cantidad de viajes que se desea computar y la eficiencia del convertidor a aplicar, para que, luego de culminada su ejecución, presente los resultados de energía consumida y regenerada, así como la relación entre estas dos últimas. Para comprender mejor el uso de estos programas, en la Figura 11.3 se muestra un diagrama de flujo con las variables que se intercambian en cada programa.

Para poder realizar la estimación, el programa hace uso de las probabilidades de carga y ocurrencia de los pisos recorridos, pero con la salvedad de considerarlas como variables independientes. Esto no es del todo cierto, debido a que sí existe una relación entre las mismas. Por ejemplo, las personas suelen acumularse en la cabina a medida que la misma baja con destino a planta baja. Sin embargo, dicho análisis probabilístico resulta dificultoso, además de que los resultados energéticos

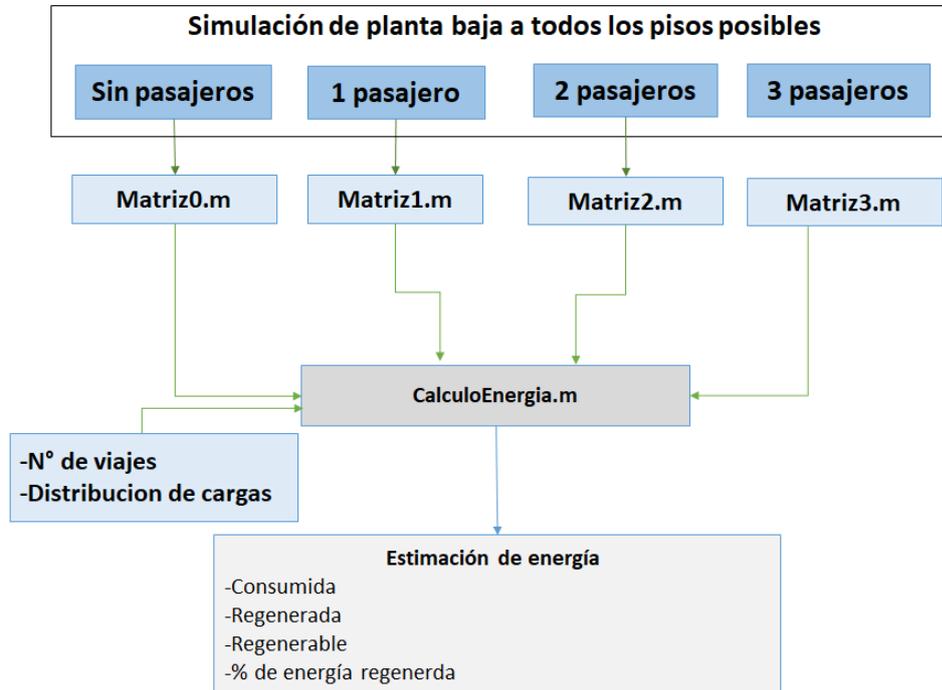


Figura 11.3: Diagrama de flujo de los programas utilizados para estimar la potencia

obtenidos mediante la suposición de independencia son satisfactorios comparados con las mediciones.

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos en la simulación y los programas de estimación, es imprescindible compararlos con las medidas recabadas, pudiéndose constatar que los resultados que ofrece la estimación son muy cercanos a los medidos.

Con una cantidad de 400 viajes simulados, se obtuvo que la energía regenerable ronda el 48 %, valor casi idéntico al que arroja las medidas (49 %) del Edificio #3, dándole validez a la estimación y a los supuestos planteados al principio.

Por su parte, para el Edificio #1 se obtuvo un porcentaje de energía regenerable simulada del 21 %, valor que también es casi idéntico al que muestran las medidas (19 %).

### 11.3. Análisis económico

En vista de que toda energía que se recupere, será energía que deja de ser consumida desde la red, es que se puede plantear un análisis económico para estudiar la viabilidad del dispositivo regenerativo.

Como punto de partida, se considera el costo del variador instalado en la edificación. El mismo es de U\$S 930 (dólares americanos).

## Capítulo 11. Estimación del consumo energético

Se hará el supuesto de que el convertidor tiene una eficiencia entorno al 94 %, y que se realizan aproximadamente 400 viajes en un día. Se tomará como referencia la *Tarifa Residencial Simple* en la escala que comprende 101 kWh a 600 kWh, con un costo actual de \$7,504 por cada kWh según Pliego Tarifario con vigencia desde el 01/01/2021 [29].

Debe contemplarse que las tarifas han presentado un aumento progresivo al transcurrir los años, es por esto que se considerará que las mismas tienen en promedio un crecimiento anual del 7 %, esto en base a los registros históricos tomados desde 2015 hasta la fecha [29].

Por lo tanto, para realizar el cálculo del tiempo requerido para recuperar la inversión, basta con plantear y resolver las siguientes ecuaciones:

$$x_0 = \$7,504/kWh$$

$$\delta = 0,070 = 7\%$$

$$x_{i+1} = (1 + \delta) \cdot x_i \rightarrow x_i = (1 + \delta)^i \cdot x_0$$

Donde  $x_i$  representa el valor de la tarifa por kWh en el  $i$ -ésimo año a partir de la fecha, y  $\delta$  representa el aumento porcentual anual promedio. Es entonces que se puede obtener la relación:

$$\Delta_{COSTO} = E \cdot \sum_{i=0}^T x_i$$

Con  $E$  la energía regenerada en un año promedio, y  $\Delta_{COSTO}$  el costo de la inversión requerida para instalar el dispositivo de regeneración en comparación con uno no regenerativo, en moneda nacional (valor de US\$ = \$44).

$$\Delta_{COSTO} = COSTO_{Regen} - COSTO_{NoRegen}$$

En caso de tratarse de un equipo de regeneración de tipo módulo para interconexión, el cálculo de  $\Delta_{COSTO}$  se ve modificado en la siguiente manera:

$$\Delta_{COSTO} = COSTO_{Módulo}$$

La variable  $E$  representa el valor de energía regenerada en un año obtenido de la estimación, con 400 viajes diarios en promedio, y  $T$  el tiempo requerido para la retribución de la inversión, en años.

Se puede verificar por medio de simples cálculos, que la sumatoria puede sustituirse por la siguiente expresión:

$$\sum_{i=0}^T x_i = \sum_{i=0}^T ((1 + \delta)^i \cdot x_0) = \frac{1 - (1 + \delta)^{T+1}}{1 - (1 + \delta)} x_0 = \frac{(1 + \delta)^{T+1} - 1}{\delta} x_0$$

### 11.3. Análisis económico

Por lo tanto, es necesario resolver la Ecuación 11.1, para poder despejar el valor que toma  $T$  en cada caso.

$$\frac{\Delta_{COSTO}}{E} = \frac{(1 + \delta)^{T+1} - 1}{\delta} x_0 \quad (11.1)$$

Reordenando términos, se obtiene:

$$\frac{\Delta_{COSTO} \cdot \delta}{E \cdot x_0} + 1 = (1 + \delta)^{T+1} \quad (11.2)$$

Para poder despejar  $T$  de la ecuación, se debe recurrir a la aplicación de logaritmos:

$$\log \left[ \frac{\Delta_{COSTO} \cdot \delta}{E \cdot x_0} + 1 \right] = (T + 1) \log [1 + \delta] \quad (11.3)$$

Llegando así a una expresión relativamente sencilla para el cálculo de  $T$  en función de los demás parámetros:

$$T = \frac{\log \left[ \frac{\Delta_{COSTO} \cdot \delta}{E \cdot x_0} + 1 \right]}{\log [1 + \delta]} - 1 \quad (11.4)$$

#### 11.3.1. Edificio #1

En caso de utilizarse el dispositivo **D1000**, el tiempo necesario para desquitar la inversión surge de la Ecuación 11.4, pero sustituyendo los valores de energía regenerada, el costo del equipo y la tarifa inicial.

En este caso, el valor obtenido para  $E$  es de 100 kWh/año, y  $\Delta_{COSTO} = \text{U\$S } 2130 - \text{U\$S } 930 = \$52,800$ . Luego:

$$\frac{\$52,800}{100 \text{ kWh/año}} = \frac{(1 + \delta)^{T+1} - 1}{\delta} (\$7,504/\text{kWh}) \quad (11.5)$$

Despejando  $T$  de la ecuación se obtiene que se tardarían 25 años en recuperar la inversión.

Si se analiza la posibilidad de instalar el módulo **R1000**, junto con el existente **LE1000**, el cálculo de  $\Delta_{COSTO}$  se ve modificado, dado que ya no es necesario el reemplazo total del equipo, sino que sólo se debe considerar el costo del módulo extra. En este caso,  $\Delta_{COSTO} = \text{U\$S } 1230 = \$56,320$  y se tardaría 26 años en recobrar el dinero invertido.

El mismo procedimiento se puede analizar para el equipo **ERS 2G**, que también es un módulo adicional. Para este dispositivo, el tiempo de retribución de inversión es aún peor que en los anteriores. Con un  $\Delta_{COSTO} = \text{U\$S } 3270 = \$143,880$ , el tiempo de retribución supera los 38 años.

## Capítulo 11. Estimación del consumo energético

Queda más que claro que la opción más rentable es instalar en un primer momento el equipo **D1000**, y en un caso de actualización el **R1000**. Ambos otorgan un reintegro de la inversión en un entorno de 26 años. Por lo tanto, bajo estos supuestos resultan totalmente inviables, porque exceden ampliamente la vida útil de la instalación.

Se muestran a continuación los resultados de los ensayos realizados en la simulación para esta edificación. Ver Figura 11.1 y Figura 11.2.

### 11.3.2. Edificio #2

Se realizaron los mismos planteamientos que en el caso anterior, pero teniendo en cuenta que se trata de una edificación de uso diferente (oficinas), y por lo tanto los viajes se concentran durante el día en horario laboral. Sin embargo, esto no resulta importante, dado que lo que termina por ser útil es el volumen de energía regenerada al cabo de un período de tiempo amplio.

Si se consideran 400 viajes diarios promedio durante un año entero, la cantidad de energía regenerada, con una eficiencia del convertidor de 94 %, ronda los 52,5 kWh/año. Por lo tanto, en este caso los costos se relacionan con el tiempo de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta_{COSTO}}{52,5kWh/año} = \frac{(1 + \delta)^{T+1} - 1}{\delta} (\$7,504/kWh) \quad (11.6)$$

En caso de utilizar el dispositivo **D1000**,  $\Delta_{COSTO} = \$52,800$ , al despejar T se obtiene que llevaría 34 años para que retorne la inversión.

De igual manera, si se analiza la posibilidad de instalar el módulo **R1000** junto con el existente **LE1000**, se obtiene que  $\Delta_{COSTO} = \$56,320$ , y el tiempo necesario para recuperar la inversión será de 35 años.

Si se estudia el caso del equipo **ERS 2G**, el tiempo requerido asciende a 48 años.

Al igual que en el primer caso, los tiempos necesarios para recuperar la inversión son muy elevados; esto los hace completamente inviables.

### 11.3.3. Edificio #3

La cantidad de medidas realizadas en el último edificio, hace posible que no se necesite estimar el consumo, y dar un valor de energía regenerada mucho más exacto.

Si se supone la instalación del equipo **D1000** con una eficiencia de regeneración en torno al 94 %, promediando los meses de febrero y marzo se obtiene que la energía regenerada es de 13,85 kWh. Este valor equivale a un consumo anual de 166,2 kWh. Volviendo a la ecuación 11.4, se obtiene para el caso del equipo

### 11.3. Análisis económico

**D1000**, con un  $\Delta_{COSTO} = \$52,800$ , que el tiempo requerido es de  $T = 19$  años. Ver Ecuación 11.7.

$$\frac{\$52,800}{166,2kWh/año} = \frac{(1 + \delta)^{T+1} - 1}{\delta} \cdot (\$7,504/kWh) \quad (11.7)$$

Si se analiza la posibilidad de instalar el módulo **R1000**, junto con el existente **LE1000**, entonces el tiempo que llevaría recuperar lo invertido son 20 años, siendo  $\Delta_{COSTO} = \$56.320$ . Se nota una gran mejora en el tiempo de reintegro, pero de todas formas continúa siendo un periodo de tiempo demasiado largo.

En el caso del equipo **ERS 2G**, el tiempo necesario es de 32 años. Este equipo difícilmente pueda ser implementado en Uruguay, debido a su muy elevado costo.

Se resumen en la Tabla 11.4 los resultados del estudio de cada equipo en las diferentes edificaciones. Los tiempos son dados en años.

Dispositivo	Edificio # 1	Edificio # 2	Edificio # 3
D1000	25	34	19
R1000	26	35	20
ERS 2G	38	48	32

Tabla 11.4: Tabla de resumen de los tiempos en años de retribución.

Quizás se podría plantear la posibilidad de que el ente energético brinde apoyos o exonere de impuestos a estos equipos, para hacerlos más accesibles.

Los gastos asociados al IVA y a los sobrecostos de importación, alcanzan el 42% del costo del equipo. Esta es la principal barrera para la implementación de los mismos, dado que a futuro se podría prever que los equipos redujeran sus costos, por motivos tecnológicos, y por una mayor preocupación medioambiental.

Resulta imperativo fomentar a nivel gubernamental la utilización de estos equipos, a partir de incentivos y ayudas económicas. Sólo así el tiempo de recuperación de la inversión para el equipo **D1000** en el tercer residencial se reduciría a 12 años.

Si se desea realizar este estudio, para otra edificación, basta con calibrar la simulación con los parámetros correspondientes. Una vez hecho esto, se deben realizar los ensayos como se explica en la Sección 11.1, para así obtener los vectores que serán utilizados por el programa **matrizEnergía**. Este último generará las matrices que necesita **calculoEnergía** para poder brindar los valores estimados de energía consumida, regenerable y regenerada.

Sería natural considerar que los porcentajes de carga se mantengan en edificaciones de características similares. Lo mismo ocurre con ocurrencia de pisos como subsuelo, planta baja y terraza, dado que son habitualmente los puntos de partida o llegada de cualquier viaje.

## Capítulo 11. Estimación del consumo energético

Surge la necesidad de reducir el tiempo que llevaría recuperar la inversión hecha para instalar drivers regenerativos. Por ello, se plantean distintos escenarios, para analizar si se reducen los tiempos de retribución.

### 11.4. Análisis de supuestos

Como se mencionó anteriormente, los tiempos de recuperación de la inversión para los casos estudiados son muy elevados, y es fundamental tratar de reducirlos. Para ello se verán algunos supuestos y se estudiará si los mismos conducen a una mejora económica y, en definitiva, una reducción de estos tiempos.

Para poder realizar una comparación, es necesario partir desde la misma base. Es por tal motivo que se realizará la estimación para el Edificio #3, sin variar parámetro alguno. Con esto se obtendrá un par de valores de energía consumida y regenerada, con los cuales poder comparar los resultados de aplicar algunas variantes.

#### 11.4.1. Caso base

Si se realiza la estimación para 400 viajes diarios en promedio durante un año entero, y considerando una eficiencia del convertidor de 94 %, se obtienen aproximadamente 202 kWh de energía regenerada al año.

Esto lleva a que para el equipo **D1000**, el tiempo de recuperación de la inversión llegue a 17 años, mientras que para el equipo **R1000** el tiempo requerido sería 18 años.

#### 11.4.2. Aumento de movilidad

Si se contempla que al momento de realizar este estudio, la situación sanitaria del país limita en gran medida la movilidad de las personas, entonces las medidas realizadas podrían no reflejar el estado anterior de uso del ascensor. Resta entonces suponer que a futuro, una vez superada la pandemia, se retome el ritmo de movilidad.

Para poder sostener dicha hipótesis, se hizo una encuesta a 500 personas con la pregunta '*Debido al COVID-19, ¿cómo cambió la frecuencia con la que usa los ascensores?*'. Los resultados arrojados fueron los siguientes:

La Figura 11.4 muestra que más del 60 % admite utilizar menos o mucho menos el ascensor debido a la emergencia sanitaria, respaldando la hipótesis antes planteada.

Es entonces razonable pensar que, una vez superada la situación actual que atraviesa Uruguay, se recuperará el nivel de movilidad anterior. Se considera que la cantidad de viajes aumentará un 30 % en dicho escenario futuro.

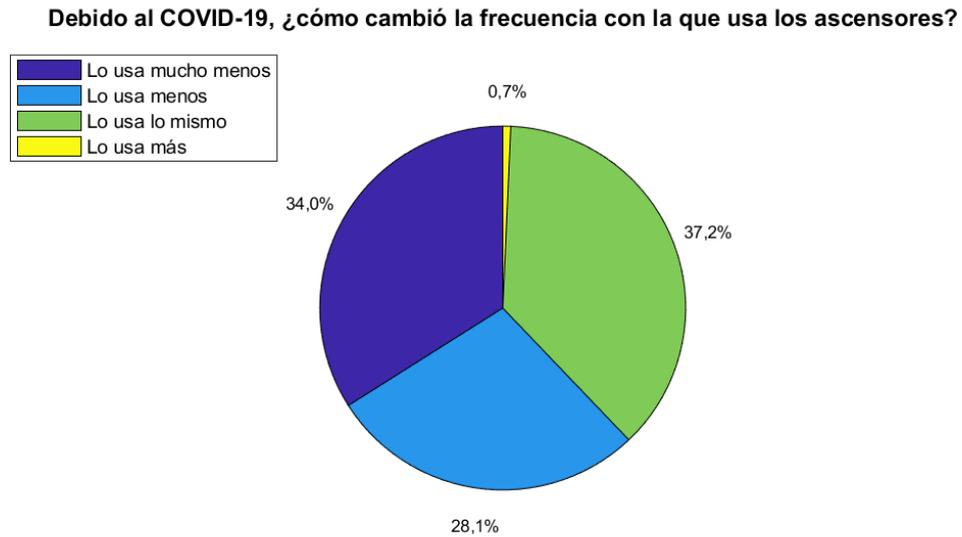


Figura 11.4: Encuesta - uso del ascensor debido al COVID-19.

De esta manera, la energía regenerada en un año con ya no 400 viajes diarios, sino 520, sería de 263 kWh, con lo cual, en el caso del equipo **D1000** el tiempo de recuperación sería de 15 años, al igual que para el equipo **R1000**.

En esta situación hipotética, la reducción en los tiempos es considerable, volviendo a estas implementaciones bastante más atractivas y viables.

### 11.4.3. Cintas de acero

Como segundo caso de estudio, se supondrá el uso de cintas de acero recubiertas de poliuretano. Las mismas resultan hasta un 40 % más livianas que los cables trenzados de acero [21]. Esto supone una mejora en las pérdidas de la instalación, por lo tanto se realizará la estimación del consumo energético del tercer residencial con esta variante.

El resultado de la estimación de energía regenerada bajo este supuesto, es de 183,5 kWh para 400 viajes de promedio durante un año. Si bien la reducción de las pérdidas hace que se tenga menos energía regenerada, también disminuye la energía consumida, traduciéndose en un ahorro económico.

Si se considera la instalación del equipo **D1000**, el tiempo de recuperación de la inversión resulta en 18 años.

Si ahora se analiza la posibilidad de instalar el módulo **R1000**, junto con el existente **LE1000**, el tiempo de recuperación será 19 años.

## Capítulo 11. Estimación del consumo energético

### 11.4.4. Combinación de ambos supuestos

Si ahora se considera el uso de cintas de acero en lugar de cables trenzados, y suponiendo que la movilidad post COVID 19 aumentará un 30 %, estos dos efectos en conjunto resultan en una energía regenerada de 238,3 kWh con lo cual para el equipo **D1000**, el tiempo de recuperación sería de 16 años, al igual que para el equipo **R1000**.

A continuación, se resumen los resultados de los supuestos en la Tabla 11.5. Donde se detallan los valores de energía consumida y regenerada, de cada supuesto, en cuatro estimaciones distintas. Para promediar dichos valores y obtener una referencia lo más acertada posible.

Variante	caso base (kWh)		aumento movilidad (kWh)		cintas de acero (kWh)		ambos casos (kWh)	
	Consumida	Regenerada	Consumida	Regenerada	Consumida	Regenerada	Consumida	Regenerada
Estimación 1	451,3	203,6	584,8	263,1	420,8	184,0	545,8	239,0
Estimación 2	447,5	201,4	583,1	262,9	419,7	182,6	546,5	238,4
Estimación 3	447,9	201,7	583,2	263,2	421,3	183,8	546,5	237,7
Estimación 4	448,2	201,2	585,3	262,4	420,9	183,7	546,2	237,9
Promedio	448,7	202,0	584,1	262,9	420,7	183,5	546,3	238,3

Tabla 11.5: Resumen de resultados energéticos según la variante estudiada.

Si se observa la Tabla 11.6, se puede comprobar que el caso que combina las cintas de acero con el aumento en la movilidad otorga un tiempo de retribución mayor que el caso que sólo contempla el aumento en la movilidad. Esto es debido a que se presenta una reducción de la energía regenerada pero también se reduce el consumo. Si se toma la diferencia entre la energía consumida y la regenerada, se tendrá el valor neto de energía tomada de la red de alimentación, con lo cual dicho valor se traduce en un costo de facturación anual. Al reducirse el consumo neto, el costo anual de facturación de la variante última, resulta menor que el que sólo contempla el aumento en la movilidad.

Desde el punto de vista de la eficiencia energética, la mejor opción es instalar cintas de acero en las edificaciones. Pero desde el punto de vista del tiempo de recuperación de la inversión del equipo regenerativo, resulta más conveniente la no utilización de las mismas, aunque la diferencia de tiempo resulta prácticamente intrascendente.

Otro aspecto muy importante, y que no debe de dejarse pasar, es que los costos de las tarifas energéticas están en continuo aumento debido a la cada vez

Variante	caso base	aumento movilidad	cintas de acero	ambos casos
Consumo (kWh)	448,7	584,1	420,7	546,3
Regeneración (kWh)	202,0	262,9	183,5	238,3
Diferencia (kWh)	246,7	321,2	237,2	308,0
$T_{D1000}$ (años)	17	15	18	16
$T_{R1000}$ (años)	18	15	19	16

Tabla 11.6: Comparativa entre las diferentes variantes y sus resultados.

## 11.4. Análisis de supuestos

más creciente demanda y la inflación. Es por consiguiente importante aclarar que las mismas se consideraron variables bajo la hipótesis de un aumento constante. Dicho aumento se obtuvo del registro histórico de tarifas desde 2015 hasta la fecha, promediándose los aumentos anuales, con el fin de linealizar el crecimiento.

### 11.4.5. Impacto medioambiental

A lo largo del proyecto se llevaron a cabo diversos estudios energéticos y económicos, lo que permitió entender la viabilidad de instalar drivers regenerativos.

No siendo el caso de Uruguay, gran cantidad de países del mundo aún dependen en gran medida de las fuentes de energía fósiles como el carbón, gas y petróleo para la conformación de su matriz energética. Es en dichos casos de gran importancia la reducción y optimización del consumo energético a nivel eléctrico.

Gracias a los cambios que han ido ocurriendo en los últimos años en Uruguay en lo que refiere al cambio de la matriz energética debido a la instalación de emprendimientos de generación eólica y fotovoltaica, se ha disminuido el consumo de fuentes de energía fósiles para la generación de electricidad, como se puede ver en la Figura 11.5 y Figura 11.6.

No obstante, dichos consumos no se anulan. Es por lo tanto imperativo realizar todo lo que esté a mano para lograr reducir la contaminación. En lo que refiere a este estudio, reducir la contaminación ocasionada por la generación de energía eléctrica, y hacer un uso más racional del recurso, aprovechando toda energía que pueda ser recuperada.

Conceptos	P. Activa MW	P. Reactiva MVar	
Hidráulica	834,6	-45,0	
Eólica	341,7	-0,3	
Biomasa	115,8	-0,8	
Fotovoltaica	126,3	0,0	
Térmica	596,7	12,0	
Interconexión con Brasil	-304,0	6,0	
Interconexión Salto Grande	-92,0	-102,0	

Figura 11.5: Tabla de potencias instantáneas de generación en Uruguay, 17/5/21 15:37. Fuente [30].

En la Figura 11.6 se puede observar que la banda de color amarillo, correspondiente al aporte a la generación de las centrales térmicas, tiene un peso importante en ese momento puntual. Esto quiere decir que se estaba generando energía a partir de fuentes no renovables, con su correspondiente emisión de contaminación al medio ambiente.

Es por tal motivo que, en la medida que sea posible, se deben de optimizar las instalaciones eléctricas, haciendo uso de las últimas tecnologías, para lograr reducir el consumo, y por consiguiente la contaminación ambiental.

## Capítulo 11. Estimación del consumo energético

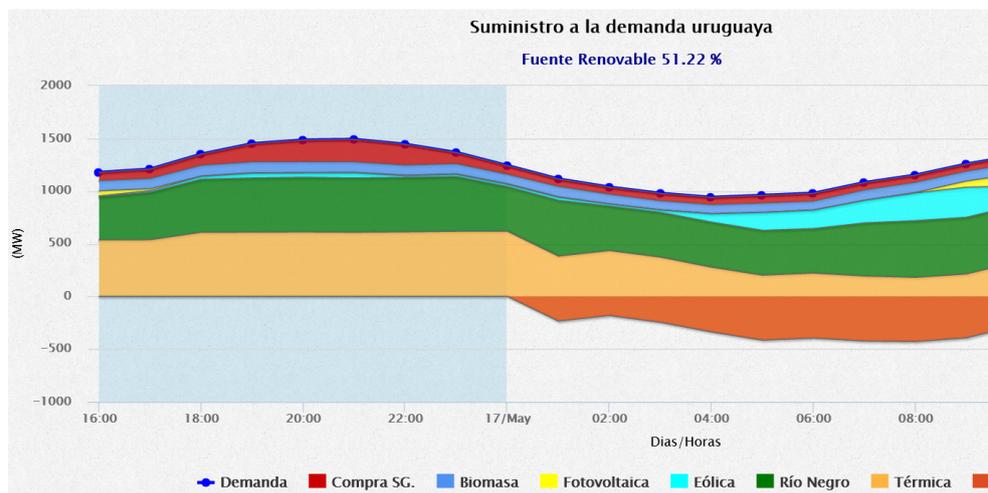


Figura 11.6: Gráfica de suministro a la demanda de Uruguay. Fuente [30].

# Capítulo 12

## Conclusiones

Sin lugar a dudas la importancia de la regeneración de energía ha aumentado significativamente en las últimas décadas, impulsado por la creciente demanda. El avance tecnológico ha sido esencial para la implementación de los dispositivos de regeneración de energía eléctrica.

Se comenzó realizando un modelo que refleje fielmente la mecánica del ascensor, y se visualizó que era incorrecto asumir ciertas idealidades respecto a la mecánica del mismo, entre las que se destacan la cuerda de masa despreciable y fricción nula en el sistema. Esto se hizo notorio cuando se comenzaron a analizar las medidas, apreciando que el par que debe ejercer el motor varía a lo largo de cualquier viaje como consecuencia del movimiento de la cuerda, y que la potencia medida por el variador cambia en función del modo de operación del motor. Este comportamiento se constató en los tres edificios estudiados, deduciendo que el segundo modelo construido es el adecuado para representar este tipo de ascensores.

Dependiendo de la aplicación buscada existen dos métodos para tratar la energía sobrante, almacenarla en supercondensadores o baterías, o devolverla directamente a la red. En caso de querer almacenar la energía para usos futuros, se prefiere altamente el uso de supercondensadores sobre las baterías, debido a su alta densidad de energía por unidad de volumen y su mayor vida útil. Por otro lado, se encuentran los inversores que permiten devolver energía a la red con la desventaja de causar distorsión armónica, problema que no está presente en los supercondensadores. En caso de que se tenga un flujo de potencia elevado se recomienda utilizar los inversores, para no tener que lidiar con grandes capacidades.

Se llevó a cabo una exitosa campaña de mediciones en los edificios residenciales, no así para el caso de oficinas, debido a que la pandemia redujo notoriamente el flujo de personas. En el Edificio #1 se perdieron una gran cantidad de medidas debido a que el automatismo implementado para guardarlas tenía errores, de todas formas se pudo hacer un análisis de las mediciones adquiridas. Este problema se solucionó para el resto de los edificios. Como se desconoce el método utilizado por el variador para medir la potencia se optó por hacer una medida con un osciloscopio y un equipo construido específicamente para esa medición, logrando

## Capítulo 12. Conclusiones

valores similares.

Uno de los objetivos principales de este proyecto era construir una simulación que refleje el funcionamiento del ascensor, sus viajes y el consumo. Se lograron muy buenos resultados en los tres edificios medidos, ya que las curvas medidas y simuladas son homologas. Además, se llevó a cabo una interfaz que permite que cualquier usuario la pueda usar sin un gran conocimiento de la herramienta Simulink. La simulación construida es una herramienta muy útil para poder estimar la viabilidad de los dispositivos en cualquier edificio, permitiendo conocer de forma rápida la energía regenerable, partiendo de una serie de ensayos.

Si bien hay un marco legal referido a los lineamientos que regulan la regeneración de energía eléctrica en Uruguay, este no contempla la inyección de energía eléctrica a la red a través de inversores utilizados en ascensores. Por lo que, en la actualidad, si se usan dispositivos bidireccionales, toda la energía regenerada por el ascensor se debe consumir en la propia edificación. En el caso de almacenar la energía con supercondensadores no se cuenta con este inconveniente.

En comparación con los marcos normativos extranjeros, como ser el de la comunidad europea, se encontró que las normas nacionales presentan algunas complicaciones como la anteriormente mencionada. Sería interesante poder contar con un marco normativo más amplio, con mayores libertades para los consumidores, como el permiso para la libre inyección de energía proveniente de cualquier fuente renovable, e incluso poder especular en base a las variaciones de las tarifas según la franja horaria. Es por lo tanto muy importante acompañar las normativas con los avances tecnológicos, para así sacar el mayor provecho posible de las fuentes de energía renovables.

El objetivo principal de este es proyecto fue estudiar la viabilidad de los drivers regenerativos en los ascensores de los edificios de Montevideo. En un primer plano se estudiaron los aspectos económicos, pero nunca se perdió de vista los medioambientales. Estudiando distintos dispositivos de regeneración, en el mejor de los casos el retorno de la inversión es de 15 años. Sin embargo, esto fluctúa mucho dependiendo del equipo a instalar y de las condiciones del ascensor y su instalación, llegando a valores mayores a las cuatro décadas. En el caso del Edificio #3, si se compara con la vida útil de la instalación, 15 años es un tiempo razonable de repago, sin perjuicio de todos los beneficios medioambientales que se logran.

Algo a tener en cuenta al instalar estos dispositivos es que se hace una inversión a largo plazo, y los usuarios deben de estar dispuestos a realizarla. Dada la situación medioambiental, es de gran importancia ser eficientes y es por esto que se debería incentivar mediante políticas públicas al uso de estos convertidores.

Si los tiempos de recuperación de la inversión resultan aceptables, mucho más lo serían con el apoyo del Estado o del ente energético. Una posibilidad razonable, sería la reducción de impuestos por la importación, o quizás, el pago de una tarifa con bonificación si se instalan dichos equipos.

# Apéndice A

## Marco legal sobre microgeneración

### A.1. Normas uruguayas

Según las directivas marcadas por el Decreto del Poder Ejecutivo N° 173/010, promulgado el 1/6/2010 [13] se dan los primeros lineamientos para reglamentar la instalación por terceros de microgeneración de origen renovable, para el autoconsumo. A continuación se mencionan algunos de los artículos más relevantes de dicho decreto:

- *Artículo 1.- Se autoriza a los suscriptores conectados a la red de distribución de baja tensión a instalar generación de origen renovable eólica, solar, biomasa o mini hidráulica. La corriente máxima de régimen generada en baja tensión por los equipos instalados no deberá superar los 16 amperios, con excepción de los suministros monofásicos en redes con la configuración de retorno por tierra, en los que la corriente máxima de régimen será 25 amperios. Asimismo, la potencia pico del equipamiento de generación instalado deberá ser menor o igual a la potencia contratada por el suscriptor. (...)*
- *Artículo 2.- El suscriptor comprendido en el Artículo 1° del presente Decreto (en adelante microgenerador) podrá intercambiar energía en forma bidireccional con la red de Distribución. Encomiéndase a la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE) la compra de toda la energía que aquél entregare a la red, según las condiciones establecidas en los artículos 4° y 5° del presente Decreto, por un periodo de 10 años a partir de la puesta en servicio de las instalaciones de microgeneración.*
- *Artículo 3.- Para estar habilitado a realizar el intercambio energético, se deberá firmar en forma previa un Convenio de Conexión con UTE y cumplir con las condiciones generales determinadas por el Ministerio de Industria, Energía y Minería. Asimismo, deberá cumplir con la reglamentación técnica específica aplicable.*

## Apéndice A. Marco legal sobre microgeneración

- *Artículo 4.- La energía entregada a la red de baja tensión por el microgenerador se remunerará al mismo precio del cargo por energía vigente en el Pliego Tarifario de UTE, de acuerdo a la tarifa contratada por aquél como suscriptor de UTE, con las excepciones descriptas en el artículo 5°.*
- *Artículo 5.- Para el caso de la Tarifa Residencial Simple, el precio establecido para la primera franja de 0 a 100 kWh se sustituirá por el correspondiente a la franja inmediata superior. Aquellos servicios incluidos en la modalidad Tarifa de Consumo Básico Residencial se regirán bajo el criterio de los clientes del tipo Tarifa Residencial Simple.*
- *Artículo 6.- El microgenerador no pagará cargos por el uso de las redes eléctricas.*
- *Artículo 7.- Todo el equipamiento comprendido en las instalaciones interiores que sea necesario para la conexión a la red de baja tensión y el eventual acondicionamiento del gabinete para alojar los nuevos equipos de medida será a cargo de cada microgenerador.*
- *Artículo 8.- Los costos vinculados a la instalación del medidor adecuado a esta modalidad de intercambio de energía, darán lugar al cobro de una tasa de conexión que UTE propondrá para su aprobación al Poder Ejecutivo.*
- *Artículo 9.- El microgenerador se autodespachará, considerándose su costo variable igual a cero. Su vinculación con el sistema y el mercado eléctrico se realizará a través del distribuidor, rigiéndose por el régimen particular establecido en el presente decreto y otros actos jurídicos accesorios.*
- *Artículo 11.- Los costos de energía asociados a esta forma de contratación se incluirán en el cálculo de las tarifas de UTE.*

A partir de lo dispuesto por el decreto del Poder Ejecutivo, es el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), el encargado de aprobar las reglamentaciones y las normas referidas al tema.

En la resolución N°1895-010 [10], del 21 de julio de 2010, se da lugar a los lineamientos que conforman las Condiciones Generales que regirán el intercambio bidireccional de energía con la red de Distribución en los casos comprendidos en el inciso primero del artículo 1 del Decreto N° 173/010 de 1 de junio de 2010.

Se mencionan los puntos que contiene:

### **I- Objeto y ámbito de aplicación**

*El objeto de este documento es establecer los requisitos generales que deben cumplir los equipos de microgeneración en instalaciones interiores, para su co-*

## A.1. Normas uruguayas

nección a las redes de Baja Tensión (BT) de Distribución de UTE, así como los aspectos procedimentales para su gestión.

Este documento está referido a las instalaciones comprendidas en el primer párrafo del artículo 1 del decreto 173/010 de 1 de junio de 2010 que establece que: "Se autoriza a los suscriptores conectados a la red de distribución de baja tensión a instalar generación de origen renovable eólica, solar, biomasa o mini hidráulica. La corriente máxima de régimen generada en baja tensión por los equipos instalados no deberá superar los 16 amperios, con excepción de los suministros monofásicos en redes con la configuración de retorno por tierra, en los que la corriente máxima de régimen será 25 amperios. Asimismo, la potencia pico del equipamiento de generación instalado deberá ser menor o igual a la potencia contratada por el suscriptor.

### II- Definiciones

a) *instalación de Micro-generación (IMG): Instalación que dispone de un equipamiento que convierte energía de Fuentes Renovables en energía eléctrica.*

b) *Fuentes Renovables: Son las fuentes de generación provenientes de recursos eólico, solar, biomasa o mini-hidráulica.*

c) *Punto de conexión y medida (PCM): Punto físico en el cual el cliente que cuenta con un sistema de micro-generación se conecta a la red de BT de UTE, y donde se encuentra el puesto de medida y control.*

d) *Potencia nominal de la IMG: Es el máximo valor entre la suma de las potencias nominales (con factor de potencia unitario) de los generadores y la de los convertidores asociados a un mismo punto de conexión.*

### III - Marco General

a) *El funcionamiento de las IMG, a las que se refiera este reglamento no deberán provocar a las redes a las que están conectadas:*

*i)- Averías.*

*ii)- Alteraciones de las magnitudes eléctricas superiores a las admitidas por las normas regulatorias y para las magnitudes cuyos límites admisibles no estén definidos en las mismas, por las definiciones en este documento.*

*iii)- Condiciones de trabajo inseguras para el personal de explotación de redes.*

b) *Las IMG a las que refiere este documento no deberán mantener tensión en la red a la que están conectadas cuando esta se desconecta del resto de las redes de Distribución - "no funcionamiento en isla ya sea por razones de trabajos de operación, mantenimiento o del servicio técnico comercial, así como porque hayan actuado las protecciones.*

c) *El punto de conexión a la red de distribución deberá ser tal que cumpla con lo establecido en los criterios de conectividad referente a la capacidad de transporte de las líneas, la potencia máxima de transformación en la subestación (MT/BT), los niveles de voltajes en BT así como los desequilibrios de tensiones o corrientes entre fases provocados por generadores distribuidos monofásicos o bifásicos.*

## Apéndice A. Marco legal sobre microgeneración

d) *Las condiciones de conexión/desconexión a la red se fijarán en función de la potencia nominal de la IMG y su impacto en las magnitudes eléctricas de la red, con el objetivo de evitar fluctuaciones que perjudiquen la calidad del producto ofrecido a los clientes de la red.*

e) *En el circuito de generación hasta el punto de conexión y medida no podrá intercalarse ningún elemento de generación o consumo distinto al objeto de este documento.*

f) *El suscriptor que instale IMG no perderá sus derechos como consumidor, establecidos en el Reglamento de Calidad de Servicio de Distribución.*

### IV - Aspectos generales referidos a la conexión de las IMG a la red de BT

#### Condiciones de Conexión

*Las condiciones de conexión de las IMG a la red de BT se fijan en función de la potencia de estas y de las capacidades de las redes, cuidando de evitar efectos perjudiciales a los clientes de la red considerando incluso los clientes con cargas sensibles.*

*En ciertos casos especiales en que la situación de la red de distribución lo amerite, UTE podrá realizar un estudio previo para la conexión de las IMG.*

#### Tensión

*La tensión nominal de la IMG coincidirá con la tensión del suministro.*

*En suministros monofásicos la IMG será monofásica.*

### V - Obligaciones del titular de la IMG

*El titular de la IMG es responsable de mantenerla en perfectas condiciones de funcionamiento, así como a los aparatos de protección e interconexión.*

*En caso que se produzca un defecto en el funcionamiento de la IMG que afecte a la red de distribución, haciendo que el suministro a los clientes quede por fuera de los límites de calidad establecidos en la reglamentación vigente, el titular de la IMG debe permitir acceso a UTE a efectos de su verificación.*

*El titular de la IMG debe poner a disposición de UTE un medio de comunicación que permita a las unidades de control de UTE contactarse con él.*

*El titular de la instalación será responsable de proteger su IMG y toda la instalación interior, así como de los enclavamientos acordados con UTE.*

*El titular de la instalación es responsable de obtener las autorizaciones municipales y de otras instituciones que correspondan.*

### VI - Obligaciones de UTE

*Comprar la energía que la IMG inyecte a la red de BT de UTE, en las condiciones establecidas en el contrato.*

*Cumplir por sí, y asegurar que sus empleados y/o personal contratado cumplan con las condiciones establecidas en el contrato, así como también, con la normativa relativa a su cumplimiento.*

## A.1. Normas uruguayas

*Conectar la IMG una vez que se haya cumplido con el trámite de la solicitud correspondiente, y se hayan cumplido a satisfacción los ensayos de entrada en servicio.*

*Reconectar la IMG una vez que los motivos de su puesta fuera de servicio se hayan subsanado.*

### VII - Derechos del titular de la IMG

*Operar la IMG conectada a la Red de UTE.*

*En su carácter de productor, usar libremente de cargos la red de Distribución, de acuerdo a lo establecido en el Artículo 6 del Decreto del Poder Ejecutivo N° 173/010.*

*No asumir a su cargo obras adicionales en la Red de UTE si cumple con los requerimientos detallados en el presente documento.*

### VIII - Derechos de UTE

*UTE podrá efectuar la desconexión de la IMG en los siguientes casos:*

*a) Cuando se vulneren las condiciones estipuladas en el convenio de conexión o en el contrato de suministro.*

*b) Cuando se ponga en peligro la seguridad de las personas o las propiedades por desperfectos de las instalaciones involucradas estando las mismas bajo la administración del distribuidor o bien siendo instalaciones internas de propiedad del usuario.*

*c) Cuando genere perturbaciones en la red que atenten contra la Calidad de Servicio de Distribución según las normas respectivas.*

*En caso que se configuren algunos de los supuestos contenidos en los literales a) o c) el corte será notificado por escrito con al menos 10 días hábiles de antelación una vez cumplido el plazo establecido por UTE para remediar la situación.*

*En el caso del literal b) el corte podrá ser realizado en forma inmediata.*

*UTE podrá realizar inspecciones para verificar el cumplimiento de los requisitos listados en el presente documento.*

En la resolución N°1896-010 [11], del 28 de julio de 2010, se da lugar a definiciones complementarias, las que tendrán validez durante un plazo de 18 meses, a partir de la fecha de la resolución. Se detalla su contenido a continuación:

### **I - Objeto y ámbito de aplicación**

*El objeto de este documento es establecer los requisitos generales que deben cumplir los equipos de microgeneración interiores no comprendidos en el primer párrafo del artículo 1 del Decreto 173/010, para su conexión a las redes de baja tensión (BT) de Distribución de UTE, así como los aspectos procedimentales para su gestión.*

*El primer párrafo del artículo 1 del Decreto 173/010 de 1 de julio de 2010*

## Apéndice A. Marco legal sobre microgeneración

Tensión nominal (V)	Potencia Máxima autorizada de IMG (kW)
230 trifásico	100
400 trifásico	150

establece que: “Se autoriza a los suscritores conectados a la red de distribución de baja tensión a instalar generación de origen renovable eólica, solar, biomasa o mini hidráulica. La corriente máxima de régimen generada en baja tensión por los equipos instalados no deberá superar los 16 amperios, con excepción de los suministros monofásicos en redes con la configuración de retorno por tierra, en los que la corriente máxima de régimen será 25 amperios. Asimismo, la potencia pico del equipamiento de generación instalado deberá ser menor o igual a la potencia contratada por el suscriptor”.

En el segundo párrafo se establece que: “Los suscritores interesados en superar los máximos establecidos precedentemente, deberán recabar en forma previa la conformidad expresa de la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE). En tales casos, serán de cargo de los interesados los costos que insuman las modificaciones a introducir a la red de distribución de baja tensión.”

### **II - Definiciones**

a) *Instalación de Micro-generación (IMG):* Instalación que dispone de un equipamiento que convierte energía de Fuentes Renovables en energía eléctrica.

b) *Fuentes Renovables:* Son las fuentes de generación provenientes de recursos eólico, solar, biomasa, o mini-hidráulica.

c) *Punto de conexión y medida (PCM):* Punto físico en el cual el cliente que cuenta con un sistema de micro-generación se conecta a la red de BT de UTE, y donde se encuentra el puesto de medida y control.

d) *Potencia nominal de la IMG:* Es el máximo valor entre la suma de las potencias nominales (con factor de potencia unitario) de los generadores y la de los convertidores asociados a un mismo punto de conexión.

e) *Tensión nominal de la IMG:* Es la tensión en alterna en bornes de la salida de la IMG.

f) *Potencia Autorizada:* Es la máxima potencia Activa que se autoriza al microgenerador a inyectar en la red de distribución de BT a través del Punto de Conexión y Medida.

### **III - Máxima potencia de IMG**

Debido a las características de la red eléctrica, la máxima potencia autorizada de la IMG es la indicada en la tabla a continuación

En todos los casos se deberá cumplir que la potencia máxima de la IMG sea menor o igual a la contratada por el suscriptor.

### **IV - Marco General**

## A.1. Normas uruguayas

a) *El funcionamiento de las IMG a las que se refiere este reglamento no deberá provocar a las redes a las que se están conectadas:*

*i - Averías.*

*ii - Alteraciones de las magnitudes eléctricas superiores a las admitidas por las normas regulatorias y para las magnitudes cuyos límites admisibles no estén definidos en las mismas, por las definidas en este documento.*

*iii - Condiciones de trabajo inseguras para el personal de explotación de redes.*

b) *Las IMG a las que se refiere este documento no deberán mantener tensión en la red a la que están conectadas cuando esta se desconecta del resto de las redes de Distribución - "no funcionamiento en isla, ya sea por razones de trabajos de operación, mantenimiento o del servicio técnico comercial, así como porque hayan actuado las protecciones.*

c) *En el punto de conexión de la IMG a la red de distribución se deberá cumplir:*

*i - Las líneas en BT deberán ser capaces de transportar la máxima potencia autorizada por la IMG.*

*ii - los transformadores BT/MT deberán ser adecuados a la potencia máxima de las IMG instaladas en su circuito.*

*iii - Los niveles de voltaje en BT serán acordes al Reglamento de Calidad de Servicio de Distribución de Energía Eléctrica.*

*iv - No existen desequilibrios importantes de tensiones o corrientes entre fases provocados por generadores distribuidos monofásicos o bifásicos, que puedan provocar perturbaciones en la red o a los clientes.*

d) *Las condiciones de conexión/desconexión a la red se fijarán para que el impacto en las magnitudes eléctricas de la red, no perjudique la calidad del producto ofrecido a los clientes.*

e) *En el circuito de generación hasta el punto de conexión y medida no podrá intercalarse ningún elemento de consumo o generación fuera del marco del decreto 173/010.*

f) *El suscriptor que instale IMG no perderá sus derechos como consumidor, establecidos en el Reglamento de Calidad de Servicio de Distribución.*

*g) La tensión nominal de la IMG coincidirá con la tensión del suministro.*

*h) En suministros monofásicos la IMG será monofásica.*

### **V - Obligaciones del titular de la IMG**

*Mantener la IMG en condiciones de funcionamiento, así como a los aparatos de protección e interconexión.*

*Permitir acceso a UTE para verificar si se produce un defecto en el funcionamiento de la IMG que afecte a la red de distribución, haciendo que el suministro a los clientes quede por fuera de los límites de calidad establecidos en la reglamentación vigente.*

*Poner a disposición de UTE un medio de comunicación que permita a las unidades de control de UTE contactarse con él.*

*Proteger su IMG y toda la instalación interior, así como de los enclavamientos acordados con UTE.*

## Apéndice A. Marco legal sobre microgeneración

*Obtener las autorizaciones municipales y de otras instituciones que correspondan.*

*Hacerse cargo de los costos de las modificaciones que sea necesario efectuar en la Red de Distribución de Baja Tensión, para la conexión de la IMG.*

### **VI - Obligaciones de UTE**

*Comprar la energía que la IMG inyecte a la red de BT de UTE, en las condiciones estipuladas por el Decreto 173/010, y las que se establezcan en el contrato de Microgeneración.*

*Cumplir por sí, y asegurar que sus empleados y/o personal contratado cumplan con las condiciones establecidas en el contrato, así como también, con la normativa relativa a su cumplimiento.*

*Conectar la IMG en los plazos específicos exigibles por la reglamentación de calidad y una vez que se hayan cumplido a satisfacción los ensayos de entrada en servicio.*

*Reconectar la IMG una vez que los motivos de su puesta fuera de servicio se hayan subsanado.*

### **VII - Derechos del titular de la IMG**

*Operar la IMG conectada a la Red de UTE.*

*En su carácter de productor, usar libre de cargos la red de Distribución, de acuerdo a lo establecido en el Artículo 6 del Decreto del Poder Ejecutivo N° 173/010.*

### **VIII - Derechos de UTE**

*Desconectar la IMG en los siguientes casos:*

*a) Cuando se vulneren las condiciones estipuladas en el convenio de conexión, o en el contrato de suministro, o en el contrato de Microgeneración.*

*b) Cuando se ponga en peligro la seguridad de las personas o las propiedades por desperfecto de las instalaciones involucradas estando las mismas bajo la administración del distribuidor o bien siendo instalaciones internas de propiedad del usuario.*

*c) Cuando genere perturbaciones en la red que atenten contra la Calidad de Servicio de Distribución según las normas respectivas.*

*En caso que se configuren algunos de los supuestos contenidos en los literales a) o c) el corte será notificado por escrito con al menos 10 días hábiles de antelación una vez cumplido el plazo establecido por UTE para remediar la situación.*

*En el caso del literal b) el corte podrá ser realizado en forma inmediata.*

*UTE podrá realizar inspecciones para verificar el cumplimiento de los requisitos listados en el presente documento.*

Con el fin de evitar emprendimientos de microgeneración que prioricen la venta de energía, en lugar de destinarla al autoconsumo, y considerando que la generación

## A.1. Normas uruguayas

para autoconsumo conlleva grandes beneficios para la economía y el medioambiente, el MIEM resolvió el 12 de mayo de 2017, [12] el agregado de ciertos lineamientos.

Entre ellos, el MIEM establece que la energía eléctrica anual que se inyecte no puede superar al consumo anual de energía eléctrica tomada de la red. Su incumplimiento llevará a penalidades, pudiéndose llegar a la rescisión unilateral del contrato. Además, al momento de solicitar la instalación de microgeneración, UTE deberá verificar que la generación estimada anual sea menor o igual a la energía consumida por el suscriptor de manera anual, considerando los consumos históricos.

*1°.- Incorpórese al numeral III “Marco General” de las “Condiciones Generales que regirán al intercambio bidireccional de energía con la red de Distribución en los casos comprendidos en el inciso primero del artículo 1 del Decreto N° 173/010 de julio de 2010”, aprobadas por resolución ministerial de 21 de julio de 2010, las siguientes literales:-----*

*g) La inyección de energía eléctrica anual del Suscriptor a la Red del Distribuidor deberá ser menor o igual al consumo anual de energía eléctrica tomada de dicha red.*

*h) Al momento de solicitar la adhesión al marco normativo para instalar la IMG, UTE deberá verificar que la generación estimada de energía eléctrica anual de la IMG es menor o igual al consumo anual de energía eléctrica del Suscriptor, tomando en cuenta los consumos históricos. En caso de tratarse de un nuevo suscriptor, se solicitará declaración jurada en relación al cumplimiento de este requisito.*

*i) El incumplimiento de las condiciones establecidas en los literales anteriores, dará lugar a la aplicación de penalidades, pudiéndose llegar a la rescisión unilateral del contrato por parte de UTE.-----*

*2°.- Incorpórese al numeral IV “Marco General” de las “Condiciones Generales que regirán el intercambio bidireccional de energía con la red de Distribución en los casos comprendidos en el párrafo segundo del artículo 1 del Decreto N° 173/010 de 1° de junio de 2010”, aprobadas por resolución ministerial de 28 de julio de 2010, prorrogada por resolución de 9 de abril de 2013, las siguientes literales:-----*

*i) La inyección de energía eléctrica anual del Suscriptor a la red del Distribuidor deberá ser menor o igual al consumo anual de energía eléctrica tomada de dicha red.*

*j) Al momento de solicitar la adhesión al marco normativo para instalar la IMG, UTE deberá verificar que la generación estimada de energía eléctrica anual de la IMG es menor o igual al consumo anual de energía eléctrica del Suscriptor, tomando en cuenta los consumos históricos. En caso de tratarse de un nuevo suscriptor, se solicitará declaración jurada en relación al cumplimiento de este requisito, acompañada de un proyecto que detalle las características de la IMG y el consumo proyectado.*

*k) El incumplimiento de las condiciones establecidas en los literales anteriores dará lugar a la aplicación de penalidades, pudiéndose llegar a la rescisión unilateral del contrato por parte de UTE.-----*

## Apéndice A. Marco legal sobre microgeneración

*3°.- Las presentes modificaciones serán de aplicación para los convenios de conexión y contratos, asociados a solicitudes de microgeneración que se presenten con posterioridad a la fecha de esta resolución.-----*

## A.2. Normas internacionales

Cita a la introducción [9].

Cita a la directiva de la UE [5].

Cita a la Modificación [6].

Se mencionan algunos extractos de la misma:

**DIRECTIVA (UE) 2019/944 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de junio de 2019 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE.**

Considerando que:

...

(10) Los consumidores desempeñan un papel fundamental para alcanzar la flexibilidad necesaria para adaptar el sistema eléctrico a la generación de electricidad renovable, distribuida y variable. Los avances tecnológicos en la gestión de la red y la generación de electricidad renovable han brindado muchas oportunidades a los consumidores. Una competencia sana en los mercados minoristas será esencial para garantizar el despliegue impulsado por el mercado de nuevos servicios innovadores que satisfagan las necesidades y competencias cambiantes de los consumidores, aumentando al mismo tiempo la flexibilidad del sistema. No obstante, la falta de información suministrada en tiempo real o cuasirreal a los consumidores, sobre su consumo de energía, les ha impedido ser participantes activos en el mercado de la energía y en la transición energética. Al capacitar a los consumidores, y dotarles de las herramientas necesarias, para participar más en el mercado de la energía, incluyendo la participación en nuevas modalidades, se pretende que los ciudadanos de la Unión se beneficien del mercado interior de la electricidad y que se alcancen los objetivos de la Unión en materia de energías renovables.

...

(37) Todos los consumidores deben poder beneficiarse de su participación directa en el mercado, en particular ajustando su consumo en función de las señales del mercado y, a cambio, beneficiarse de precios reducidos de la electricidad o de otros pagos de incentivos. Es probable que los beneficios de dicha participación activa aumenten con el paso del tiempo, a medida que los que de otro modo serían consumidores pasivos sean más conscientes de sus posibilidades como clientes activos, y a medida que la información sobre las posibilidades de participación activa sea más fácilmente accesible y se conozca mejor. Los consumidores deben tener la posibilidad de participar en todas las formas de respuesta de demanda. Por lo tanto, deben tener la posibilidad de beneficiarse del despliegue completo de los sistemas de medición inteligentes y, cuando dicho despliegue haya recibido una evaluación negativa, deben tener la posibilidad de elegir un sistema de medición

## Apéndice A. Marco legal sobre microgeneración

inteligente y un contrato con precios dinámicos de electricidad. Esto debe permitirles ajustar su consumo en función de las señales de precios en tiempo real que reflejen el valor y el coste de la electricidad o del transporte en diferentes períodos de tiempo, si bien los Estados miembros deben garantizar que la exposición de los consumidores a los riesgos de los precios mayoristas sea razonable. Se debe informar a los consumidores de los beneficios y los posibles riesgos para los precios que pueden conllevar los contratos con precios dinámicos de electricidad. Los Estados miembros también deben garantizar que no sean penalizados aquellos consumidores que elijan no participar activamente en el mercado. En su lugar, se les debe facilitar la toma de decisiones informadas sobre las opciones a su disposición, de la forma más adecuada a las condiciones del mercado.

...

(42) Los consumidores deben poder consumir, almacenar y/o vender la electricidad autogenerada en el mercado y participar en todos los mercados de la electricidad, proporcionando flexibilidad al sistema, por ejemplo mediante el almacenamiento de energía (como el almacenamiento usando vehículos eléctricos), mediante la respuesta de demanda o mediante los sistemas de eficiencia energética. Los nuevos avances tecnológicos facilitarán esas actividades en el futuro. Sin embargo, existen barreras legales y comerciales que incluyen, por ejemplo, tasas desproporcionadas para la electricidad consumida a nivel interno, obligaciones de alimentar el sistema energético con la electricidad autogenerada y cargas administrativas, como las necesidades de los consumidores que autogeneran electricidad y la venden a la red de cumplir los requisitos aplicables a los suministradores, etc. Deben eliminarse tales obstáculos, los cuales impiden a los consumidores autogenerar electricidad y consumir, almacenar o vender en el mercado la electricidad autogenerada, si bien debe garantizarse que dichos consumidores contribuyan de forma adecuada a los costes del sistema. Los Estados miembros deben poder incluir en su normativa nacional distintas disposiciones reguladoras en lo que respecta a los impuestos y gravámenes para los clientes activos individualmente y para aquellos que actúan conjuntamente, así como para los hogares y otros clientes finales.

...

### ***CAPÍTULO I***

#### ***OBJETO Y DEFINICIONES***

##### *Artículo 1*

##### **Objeto**

La presente Directiva establece normas comunes en materia de generación, transporte, distribución, almacenamiento de energía y suministro de electricidad, así como normas relativas a la protección de los consumidores, con vistas a la creación en la Unión de unos mercados de la electricidad competitivos realmente integrados, centrados en el consumidor, flexibles, equitativos y transparentes.

Aprovechando las ventajas de un mercado integrado, la presente Directiva pretende garantizar unos precios y costes de la energía asequibles y transparentes para los consumidores, un elevado grado de seguridad de suministro y una suave transición hacia un sistema energético sostenible bajo en carbono. Define normas fundamentales relativas a la organización y funcionamiento del sector eléctrico de la Unión, en particular normas sobre la capacitación y la protección de los consumidores, sobre el acceso abierto al mercado integrado, sobre el acceso de terceras partes a las infraestructuras de transporte y de distribución, requisitos en materia de separación y normas relativas a la independencia de las autoridades reguladoras en los Estados miembros.

La presente Directiva también establece formas de cooperación entre los Estados miembros, las autoridades reguladoras y los gestores de redes de transporte a fin de crear un mercado interior de la electricidad totalmente interconectado que incremente la integración de electricidad procedente de fuentes renovables, la libre competencia y la seguridad de suministro.

### *Artículo 2*

#### **Definiciones**

A los efectos de la presente Directiva, se entenderá por:

- 1) «cliente» : el cliente mayorista y el cliente final de electricidad;
- 2) «cliente mayorista» : cualquier persona física o jurídica que compre electricidad con fines de reventa dentro o fuera de la red en la que dicha persona esté instalada;
- 3) «cliente final» : el cliente que compre electricidad para consumo propio;
- 4) «cliente doméstico» : el cliente que compre electricidad para su propio consumo doméstico, excluidas las actividades comerciales o profesionales;
- 5) «cliente no doméstico» : cualquier persona física o jurídica cuya compra de electricidad no esté destinada a su propio consumo doméstico; en esta definición se incluyen los productores, los clientes industriales, las pequeñas y medianas empresas, las empresas y los clientes mayoristas;
- 8) «cliente activo» : un cliente final, o un grupo de clientes finales que actúan conjuntamente, que consume o almacena electricidad generada dentro de sus locales situados en un ambiente confinado o, si así lo permite el Estado miembro, en otras ubicaciones, o que venda electricidad autogenerada o participe en planes de flexibilidad o de eficiencia energética, siempre que esas actividades no constituyan su principal actividad comercial o profesional;
- 9) «mercados de la electricidad» : los mercados de electricidad, incluidos los no organizados y los intercambios de electricidad, los mercados de negociación de energía, capacidad, balance y servicios auxiliares en cualquier período, incluidos los mercados de futuros, los mercados diarios y los mercados intradiarios;
- 18) «agregación» : una función realizada por una persona física o jurídica que combina múltiples consumos de clientes o electricidad generada para su venta, compra o subasta en cualquier mercado de electricidad;
- 19) «agregador independiente» : un participante en el mercado que presta ser-

## Apéndice A. Marco legal sobre microgeneración

vicios de agregación y que no está relacionado con el suministrador del cliente;

20) «respuesta de demanda» : el cambio de consumo de electricidad por parte de los clientes finales, respecto de sus pautas de consumo normales o actuales como respuesta a las señales del mercado, incluidos aquellos en respuesta a los precios cronovariantes de la electricidad o los pagos de incentivos, o como respuesta a la aceptación de la oferta de los clientes finales para vender una reducción o un incremento de la demanda a un precio en un mercado organizado tal como se define en el artículo 2, punto 4, del Reglamento de Ejecución (UE) n.º 1348/2014 de la Comisión ( 2 ), bien individualmente o mediante agregación;

29) «gestor de la red de distribución» : toda persona física o jurídica que sea responsable de la explotación, el mantenimiento y, en caso necesario, el desarrollo de la red de distribución en una zona determinada, así como, en su caso, de sus interconexiones con otras redes, y de garantizar que la red tiene capacidad para asumir, a largo plazo, una demanda razonable de distribución de electricidad;

30) «eficiencia energética» : la relación entre la producción de un rendimiento, servicio, bien o energía, y el gasto de energía;

31) «energía procedente de fuentes renovables» o «energía renovable» : la energía procedente de fuentes renovables no fósiles, es decir, energía eólica, energía solar (solar térmica y solar fotovoltaica) y energía geotérmica, energía ambiente, energía mareomotriz, energía undimotriz y otros tipos de energía oceánica, energía hidráulica y energía procedente de biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración, y biogás;

### ***CAPÍTULO III***

#### ***EMPODERAMIENTO Y PROTECCIÓN DEL CONSUMIDOR***

##### *Artículo 13*

##### **Contrato de agregación**

1. Los Estados miembros garantizarán que todos los clientes sean libres para comprar y vender servicios de electricidad, incluida la agregación, distintos al suministro, independientemente de su contrato de suministro de electricidad y obtenidos a través de una empresa eléctrica de su elección.

2. Los Estados miembros garantizarán que, cuando un cliente final desee celebrar un contrato de agregación, el cliente final tenga derecho a hacerlo sin el consentimiento de las empresas eléctricas del cliente final.

Los Estados miembros se asegurarán de que los participantes en el mercado que presten servicios de agregación informen a los clientes acerca de todas las condiciones de los contratos que les ofrezcan.

3. Los Estados miembros garantizarán que los clientes finales tengan derecho a recibir gratuitamente, al menos una vez por cada período de facturación si el cliente los solicita, todos los datos pertinentes a la respuesta de demanda o los datos sobre electricidad suministrada y vendida.

4. Los Estados miembros garantizarán que los derechos enunciados en los apartados 2 y 3 se reconozcan a todos los consumidores finales de forma no discrimi-

natoria en lo que atañe a costes, esfuerzo y tiempo. En particular, los Estados miembros velarán por que los clientes no estén sujetos a requisitos técnicos y administrativos, procedimientos y gastos discriminatorios por parte de su suministrador basados en si tienen un contrato con un participante en el mercado que preste servicios de agregación.

### *Artículo 15*

#### **Clientes activos**

1. Los Estados miembros garantizarán que los clientes finales tengan derecho a actuar como clientes activos sin estar sujetos a requisitos técnicos o administrativos, procedimientos o gastos, desproporcionados o discriminatorios, ni a tarifas de acceso a la red que no reflejen los costes.

2. Los Estados miembros garantizarán que los clientes activos:

a) tengan derecho a operar directamente o mediante agregación;

b) tengan derecho a vender electricidad autogenerada, en particular mediante acuerdos de compraventa de energía;

c) tengan derecho a participar en programas de flexibilidad y eficiencia energética;

d) tengan derecho a delegar en un tercero la gestión de las instalaciones requeridas para sus actividades, incluida la instalación, el funcionamiento, la gestión de los datos y el mantenimiento, sin que se considere a ese tercero como un cliente activo;

e) estén sujetos a tarifas de acceso a la red que reflejen los costes, transparentes y no discriminatorias, que tengan en cuenta separadamente la electricidad vertida a la red y la electricidad consumida de la red, de conformidad con el artículo 59, apartado 9, de la presente Directiva y con el artículo 18 del Reglamento (UE) 2019/943, asegurando que contribuyen de manera adecuada y equilibrada al reparto general de los costes del sistema de conformidad con el artículo 16 del Reglamento (UE) 2019/943;

f) sean económicamente responsables de los desvíos que provoquen en el sistema eléctrico; a estos efectos, serán sujetos de liquidación responsables del balance o delegarán su responsabilidad en materia de balance con arreglo a lo dispuesto en el artículo 5 del Reglamento (UE) 2019/943.

3. Los Estados miembros podrán tener en el Derecho nacional diferentes disposiciones aplicables para los clientes activos individuales y para los clientes activos que actúen conjuntamente, siempre que todos los derechos y obligaciones establecidos en el presente artículo se apliquen a todos los clientes activos. Cualquier diferencia de trato de los clientes finales que actúen conjuntamente será proporcionada y estará debidamente justificada.

4. Los Estados miembros que tengan en vigor sistemas que no contabilizan por separado la electricidad vertida a la red y la electricidad consumida procedente de la red no concederán nuevos derechos en virtud de esos sistemas a partir del 31 de diciembre de 2023. En todo caso, los clientes sujetos a los sistemas existentes tendrán en todo momento la posibilidad de optar por un nuevo sistema que tenga

## Apéndice A. Marco legal sobre microgeneración

en cuenta por separado la electricidad vertida a la red y la electricidad consumida procedente de la red como base para el cálculo de las tarifas de acceso a la red.

5. Los Estados miembros velarán por que los clientes activos que posean una instalación de almacenamiento:

a) tengan derecho a una conexión a la red en un plazo razonable a partir de la solicitud, siempre que se cumplan todas las condiciones necesarias, como las responsabilidades de balance y un esquema de medida adecuado;

b) no estén sujetos a ninguna duplicación de gastos, incluidas las tarifas de acceso a la red, para la electricidad almacenada que permanezca en sus instalaciones o a la hora de prestar servicios de flexibilidad a los gestores de redes;

c) no estén sujetos a requisitos o tasas de concesión de licencias desproporcionados;

d) estén autorizados a prestar varios servicios al mismo tiempo, cuando sea técnicamente viable.

### *Artículo 17*

#### **Respuesta de demanda mediante agregación**

1. Los Estados miembros permitirán y fomentarán la participación de la respuesta a la demanda mediante agregación en los mercados de electricidad. Los Estados miembros permitirán a los clientes finales, incluidos aquellos que ofrecen respuesta de demanda mediante agregación, participar junto a los productores de manera no discriminatoria en todos los mercados de electricidad.

2. Los Estados miembros velarán por que, al obtener servicios auxiliares, los gestores de redes de transporte y los gestores de redes de distribución traten a los participantes en el mercado que presten servicios de agregación de respuesta de demanda de forma no discriminatoria junto con los productores, basándose en sus capacidades técnicas.

3. Los Estados miembros garantizarán que sus marcos jurídicos pertinentes contengan al menos los siguientes elementos:

a) el derecho de cada participante en el mercado activo que preste servicios de agregación, incluidos los agregadores independientes, a entrar en los mercados de electricidad sin el consentimiento de otros participantes en el mercado;

b) normas no discriminatorias y transparentes que asignen claramente las funciones y las responsabilidades de todas las empresas eléctricas y los clientes;

c) normas y procedimientos no discriminatorios y transparentes para el intercambio de datos entre los participantes en el mercado que presten servicios de agregación y otras empresas eléctricas, que garanticen el acceso fácil a los datos en condiciones equitativas y no discriminatorias y, al mismo tiempo, protejan plenamente la información comercial sensible y los datos personales de los clientes;

d) la obligación de los participantes en el mercado que presten servicios de agregación de ser responsables económicamente de los desvíos que causen en el sistema eléctrico; a tales efectos, serán sujetos de liquidación responsables del balance o delegarán su responsabilidad en materia de balance con arreglo a lo dispuesto en el artículo 5 del Reglamento (UE) 2019/943;

## A.2. Normas internacionales

e) que los clientes finales que tengan un contrato con agregadores independientes no deban hacer frente a pagos, multas u otras restricciones contractuales indebidos solicitados por sus suministradores;

f) un mecanismo de resolución de litigios entre participantes en el mercado que presten servicios de agregación y otros participantes en el mercado, incluida la responsabilidad por desvíos.

4. Los Estados miembros podrán exigir a las empresas eléctricas o los clientes finales participantes que paguen una compensación económica a los demás participantes en el mercado o a sus sujetos de liquidación responsables del balance si dichos participantes en el mercado o a sus sujetos de liquidación responsables del balance que resulten directamente afectados por la activación de la respuesta a la demanda. Dicha compensación económica no debe crear obstáculos a la entrada en el mercado de participantes en el mercado que presten servicios de agregación ni obstáculos a la flexibilidad. En tales casos, la compensación económica se limitará estrictamente a cubrir los costes resultantes en que incurran los suministradores de los clientes participantes o sus sujetos de liquidación responsables del balance durante la activación de la respuesta de demanda. El método de cálculo de dicha compensación podrá tener en cuenta los beneficios inducidos por los agregadores independientes a otros participantes en el mercado y, en tal caso, se podrá requerir a los agregadores o los clientes participantes que contribuyan a dicha compensación, pero solo en la medida en que los beneficios para todos los suministradores, los clientes y sus sujetos de liquidación responsables del balance no excedan de los costes directos en que hubieran incurrido. El método de cálculo estará sujetos a la aprobación de la autoridad de reglamentación u otra autoridad nacional competente.

5. Los Estados miembros garantizarán que las autoridades reguladoras o, si así lo exigieran sus ordenamientos jurídicos nacionales, los gestores de redes de transporte y los gestores de redes de distribución, en estrecha cooperación con los participantes en el mercado y con los clientes finales, definan los requisitos técnicos relativos a la participación de la respuesta de demanda en todos los mercados de electricidad sobre la base de las características técnicas de tales mercados y las capacidades de respuesta de demanda. Dichos requisitos incluirán la participación que implique consumos agregados.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Referencias

- [1] Kheir Al-Kodmany. Tall buildings and elevators: A review of recent technological advances. *Buildings*, 5:1070–1104, 09 2015.
- [2] Javier Piedrafita Mateo Iglesias Iván Echeverría Alvaro Pradas, Fernando Arteche. Energy recovery system for lifts, 06 2016.
- [3] MP ASCENSORES. Transporte vertical. información técnica general, 2017.
- [4] Michael Bierhoff. Analysis and design of grid-tied inverter with lcl filter, 2016.
- [5] DIRECTIVA (UE) 2019/944 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. Sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la directiva 2012/27/ue. url <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>.
- [6] MODIFICACIÓN DIRECTIVA (UE) 2019/944 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. Sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la directiva 2012/27/ue. url <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/2019-06-14>.
- [7] CSBEAVER. url <https://csbeaver.com/blog/como-fabrican-cables-acero-galvanizado/>.
- [8] A. T. de Almeida, C. Patrão, J. Fong, R. Araújo, U. Nunes, L. Rivet, U. Lindegger, M. Nanetti, W. Cariani, A. Disi, L. Manduzio, C. Viola, S. Hirzel, E. Dütschke, J. Oberschmidt, T. Fleiter, T. Skoczkowski, R. Zwierchanowski, K. Brzoza–Brzezina, and K. Kisiel. Energy efficient elevators and escalators, 2010.
- [9] INTRODUCCIÓN A DIRECTIVA 2019/944 de la UE. Mercado interior de la electricidad. url <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=legisum:4404055>.
- [10] Resolución 1895/010 del MIEM. Requisitos generales para la conexión de instalaciones de microgeneración a la red de baja tensión de ute. url <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/institucional/normativa/resolucion-n-1895010-requisitos-generales-para-conexion-instalaciones>.

## Referencias

- [11] Resolución 1896/010 del MIEM. Requisitos generales para la conexión de instalaciones de microgeneración a la red de baja tensión de ute. url <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/institucional/normativa/resolucion-n-1896010-requisitos-generales-para-conexion-instalaciones>.
- [12] Resolución 42/017 del MIEM. Incorporación de condiciones para el intercambio bidireccional de energía, en los casos comprendidos por el decreto n° 173/010. url <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/institucional/normativa/resolucion-n-42017-incorporacion-condiciones-para-intercambio-bidireccional>.
- [13] Decreto 173/010 del Poder Ejecutivo. Regulación de microgeneración. url <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/173-2010>.
- [14] Formula 1 dictionary. Kers. url <http://www.formula1-dictionary.net/kers.html>.
- [15] J.M.K.C. Donev et al. (2018). Energy education - regenerative braking. url [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Regenerative\\_braking](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Regenerative_braking).
- [16] Santiago García. El ascensor. pages 4–6, 09 2015.
- [17] GEFRAN. url <https://www.gefran.com/es/products/239-avry-inverter-vectorial-de-control-por-orientacion-de-campo-para-motores-sincronos-con-recuperacion-de-energia-para-ascensores>.
- [18] INFORLIFT. Tipo de suspensión en ascensores. url <https://inforlift.com/tipo-de-suspension-en-ascensores/>.
- [19] IPH. url <https://www.iphglobal.com/uploads/downloads/622805001491309987.pdf>.
- [20] Eva Clara Pérez Lobo. Estudio de los supercondensadores y su viabilidad como sistema de almacenamiento energético en instalaciones fotovoltaicas, 2016.
- [21] J. Luna, R. Gálvez, P. Hernández, A Ribas, A. Arangüena, I. Linares, C. Jiménez, and J. Pérez. Guía sobre ahorro y eficiencia energética en ascensores, 2016.
- [22] MathWorks. Ac6 - pm synchronous 3hp motor drive. url <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/ac6-pm-synchronous-3hp-motor-drive.html;jsessionid=1fe60aef00958d0443ef10a2d56e>.
- [23] E. D. Mitronikas, D. V. Spyropoulos, N. P. Papanikolaou, E. C. Tatakis, and N. Spyropoulos. Energy saving during modern lift operation. In *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pages 756–761, 2014.
- [24] Motorpasion. 1968 amc amitron, el prototipo eléctrico que sucumbió al petróleo. url <https://www.motorpasion.com/prototipos/1968-amc-amitron-el-prototipo-electrico-que-sucumbio-al-petroleo>.

## Referencias

- [25] Daniel Murias. Baterías de estado sólido. url <https://www.motorpasion.com/industria/baterias-estado-solido-que-que-futuro-automovil-ri>, 02 2020.
- [26] OTIS. Modernización gen2®. url <https://www.otis.com/es/es/modernizacion/gen2-modernizacion/>.
- [27] Epic Power. url <https://epicpower.es/producto/ers-2g-sistema-de-recuperacion-de-energia/>.
- [28] Alvaro Pradas. One way energy recovery system for lifts, 2014.
- [29] Pliego tarifario UTE. url <https://www.ute.com.uy/clientes/mi-factura/precios-actuales>.
- [30] UTE. url <https://portal.ute.com.uy/composicion-energetica-y-potencias>.
- [31] W. Uturbey. Conversores dc-dc. url <https://iie.fing.edu.uy/ense/assign/elpot1/dcdc.pdf>, 06 1996.
- [32] Slobodan N. Vukosavic. *Electrical Machines*. Springer, Belgrade, Serbia, 2013.
- [33] Yaskawa. url <https://www.yaskawa.com/products/drives/industrial-ac-drives/system-components/r1000-regenerative-unit>.
- [34] Yaskawa. url <https://www.yaskawa.com/products/drives/industrial-ac-drives/system-components/d1000-regenerative-converter>.
- [35] INC YASKAWA AMERICA. Yaskawa variador ca-l1000e, manual técnico, 2014.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Índice de tablas

3.1. Clasificación del tipo de ascensor según su velocidad, recorrido y carga. Fuente [21]. . . . .	12
4.1. Parámetros del primer modelo del ascensor. . . . .	16
4.2. Parámetros del segundo modelo del Ascensor. . . . .	17
4.3. Parámetros de la curva de velocidad que el variador de frecuencia permite modificar. Fuente [35]. . . . .	21
5.1. Comparación entre elementos de almacenamiento de energía. Fuente [25]. . . . .	32
6.1. Comparación de equipos. . . . .	40
7.1. Características del edificio #1. . . . .	42
7.2. Características del edificio #2. . . . .	43
7.3. Características del edificio #3. . . . .	44
7.4. Pendientes promedios por edificio. . . . .	59
7.5. Potencia de pérdidas promedio para los viajes estudiados. . . . .	60
7.6. Pérdidas promedio de los edificios medidos. . . . .	64
7.7. Comparación entre la masa de la cabina y del contrapeso de cada edificio. . . . .	64
7.8. Parámetros de cada edificio utilizados para el cálculo de la carga de la cabina. . . . .	69
7.9. Proporción del IMC en Uruguay. . . . .	69
7.10. Encuesta - peso promedio. . . . .	69
8.1. Parámetros característicos del edificio. . . . .	89
8.2. Comparación entre resultados ingresados y la curva construida de velocidad. . . . .	91
8.3. Comparación entre medidas conocidas y simulación en el Edificio #1. . . . .	100
8.4. Parámetros característicos de la simulación en los edificios medidos. . . . .	101
9.1. Resumen - valores límites para equipamientos a instalar para microgeneración. . . . .	112
9.2. Máxima potencia autorizada de IMG. . . . .	112
10.1. Resultados energéticos. . . . .	122

## Índice de tablas

11.1. Distribución de cargas. . . . .	127
11.2. Distribución de pisos. . . . .	128
11.3. Distribución de pisos. . . . .	128
11.4. Tabla de resumen de los tiempos en años de retribución. . . . .	133
11.5. Resumen de resultados energéticos según la variante estudiada. . .	136
11.6. Comparativa entre las diferentes variantes y sus resultados. . . . .	136

# Índice de figuras

1.1. Funcionamiento del motor como generador con carga pesada. . . .	2
1.2. Funcionamiento del motor como generador con carga liviana. . . .	2
2.1. Automóvil AMC Amitron. Fuente [24]. . . . .	4
2.2. Dispositivo KERS de F1. Fuente [14]. . . . .	4
3.1. Ascensor con cuarto de máquinas. Fuente [21]. . . . .	6
3.2. Ascensor sin cuarto de máquinas. Fuente [8]. . . . .	6
3.3. Esquema de una instalación de un ascensor. Fuente [8]. . . . .	7
3.4. Cinta plana de acero recubierta de poliuretano. Fuente [21]. . . . .	7
3.5. Cable de acero galvanizado. Fuente [7]. . . . .	8
3.6. Engranajes helicoidales. Fuente [8]. . . . .	8
3.7. Tornillo sin fin y corona. Fuente [8]. . . . .	8
3.8. Motor síncrono de imanes permanentes. Fuente [26]. . . . .	9
3.9. Esquema de conexión del motor con variador de frecuencia. . . . .	10
3.10. Sistemas de reducción de torque en ascensores. Fuente [18]. . . . .	11
4.1. Modelo mecánico del ascensor. . . . .	14
4.2. Diagrama de bloques del primer modelo mecánico. . . . .	15
4.3. Modelo mecánico del ascensor con sistema de poleas 2:1. . . . .	17
4.4. Diagrama de Bloques del segundo modelo mecánico. . . . .	20
4.5. Curva de velocidad que otorga el variador de frecuencia. Fuente [35].	21
4.6. Curva simplificada de velocidad del Ascensor. . . . .	22
5.1. Modelo de los SC. . . . .	26
5.2. Circuito equivalente de SC en serie. . . . .	27
5.3. Sistema de regeneración con banco de SC. . . . .	27
5.4. Alimentación a sistema auxiliar con SC. . . . .	28
5.5. Diagrama de Flujo de energía. . . . .	29
5.6. Diagrama de Flujo de energía. . . . .	29
5.7. Convertidor Buck-Boost. . . . .	30
5.8. Esquema de conexión del motor alimentado de un inversor. . . . .	31
5.9. Esquema típico en ascensor convencional. . . . .	33
5.10. Esquema a implementar. . . . .	34
5.11. Circuito a implementar para lograr un flujo de energía bidireccional.	34
5.12. Filtro LCL. . . . .	35

## Índice de figuras

6.1. Imagen del dispositivo ERS 2G [27] . . . . .	37
6.2. Tabla extraída del Brochure de ERS 2G. Fuente [27]. . . . .	38
6.3. Imagen del inversor AVRy. Fuente [17]. . . . .	38
6.4. Tabla extraída del catalogo de AVRy. Fuente [17]. . . . .	39
6.5. Imagen del dispositivo de frenado regenerativo R1000. Fuente [33].	39
6.6. Imagen del dispositivo de frenado regenerativo D1000. Fuente [34].	40
7.1. Parte de un archivo exportado por el variador. . . . .	46
7.2. Porcentaje de velocidad en función del tiempo. . . . .	47
7.3. Velocidad y recorrido de la cabina sin corrección en el signo de la velocidad. . . . .	48
7.4. Velocidad y recorrido de la cabina con corrección en el signo de la velocidad. . . . .	48
7.5. Velocidad de la cabina en pisos consecutivos para el tercer edificio medido. . . . .	49
7.6. Velocidad y recorrido de la cabina en pisos consecutivos para el tercer edificio medido. . . . .	50
7.7. Potencia instantánea - viaje desde piso 0 a 7 - edificio #1. . . . .	51
7.8. Potencia y energía instantánea - viaje desde piso 0 a 7 - edificio #1.	51
7.9. Torque devuelto por el variador (en porcentaje) en el primer edificio.	52
7.10. Torque entregado por el variador vs torque calculado con potencia y velocidad. . . . .	53
7.11. Torque calculado con potencia sin signo vs torque de referencia del variador. . . . .	54
7.12. Torque y potencia. . . . .	55
7.13. Velocidad y torque de la cabina en pisos consecutivos para el tercer edificio medido. . . . .	57
7.14. Potencia y torque en varios viajes del primer edificio medido. . . .	58
7.15. Potencia y torque en varios viajes del primer edificio medido. . . .	58
7.16. Edificio #3: Pérdidas en un viaje del piso 5 al 0 con 2 personas. . .	61
7.17. Ejercicio #3: Pérdidas en un viaje desde el piso 11 al 5 con 2 personas.	61
7.18. Edificio #3: Pérdidas en un viaje desde el piso 11 al -1 con la cabina vacía. . . . .	62
7.19. Edificio #3: Pérdidas en un viaje desde el piso 11 al -1 con la cabina vacía. . . . .	62
7.20. Torque equivalente a las pérdidas calculadas en el primer edificio medido. . . . .	63
7.21. Torque equivalente a las pérdidas calculadas en el segundo edificio medido. . . . .	63
7.22. Torque considerando las pérdidas vs. torque sin considerar pérdidas.	66
7.23. Modelo mecánico del ascensor. . . . .	66
7.24. Torque considerando las pérdidas. . . . .	67
7.25. Torque con puntos críticos para un viaje del piso más alto al más bajo vacío. . . . .	68
7.26. Diagrama de flujo del procesamiento diario de las medidas. . . . .	70
7.27. Diagrama de flujo del procesamiento mensual de las medidas. . . .	71

7.28. Circuito de potencia a medir. . . . .	72
7.29. Circuito para realizar la medida del voltaje. . . . .	73
7.30. Curva de saturación del transformador de voltaje. . . . .	74
7.31. Curva escalada a la frecuencia nominal del motor. . . . .	74
7.32. Ensayo en frecuencia del filtro pasa-bajos. . . . .	76
7.33. Circuito para medir la corriente. . . . .	77
7.34. Curva de saturación del transformador de corriente. . . . .	78
7.35. Verificación de desfase nulo introducido por el TI a frecuencia 50 Hz con relación 25/5. . . . .	79
7.36. Equipo de medición de voltaje. . . . .	80
7.37. Voltaje adquirido proporcional a la corriente. . . . .	83
7.38. Voltaje adquirido en osciloscopio proporcional al voltaje de alimen- tación del motor. . . . .	83
7.39. Contenido armónico del voltaje. . . . .	84
7.40. Potencia calculada vs Potencia entregada por el variador, viaje de 0 a 11 vacío. . . . .	84
7.41. Potencia calculada vs Potencia entregada por el variador, viaje de 5 a 0 con 2 personas. . . . .	85
8.1. Curvas de entrada de la simulación. . . . .	88
8.2. Velocidad de entrada y posición para viaje del piso 0 al 7 del primer edificio. . . . .	90
8.3. Ampliación en velocidad de nivelación. . . . .	90
8.4. Comparación de la velocidad: simulado vs. real. . . . .	91
8.5. Bloque del controlador del motor en Simulink. Fuente [22]. . . . .	92
8.6. Interior del bloque AC6. . . . .	92
8.7. Ecuación 4.23 implementada en simulink. . . . .	94
8.8. Señal de freno implementada en simulink. . . . .	95
8.9. Señal de freno implementada en simulink. . . . .	95
8.10. Comportamiento de la señal de freno. . . . .	96
8.11. Velocidad de referencia vs velocidad simulada del rotor. . . . .	97
8.12. Diagrama de bloques implementado en Simulink para generar la asimetría en el torque. . . . .	97
8.13. Interior del bloque principal que se encarga de generar la asimetría en el torque. . . . .	98
8.14. Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edi- ficio #1. . . . .	98
8.15. Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edi- ficio #1. . . . .	99
8.16. Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edi- ficio #1. . . . .	99
8.17. Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edi- ficio #2. . . . .	101
8.18. Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación en el Edi- ficio #3. . . . .	102
8.19. Variables de interés para $T_s = 0,5\mu s$ . . . . .	102

## Índice de figuras

8.20. Variables de interés para $T_s = 20\mu s$ . . . . .	103
8.21. Curva simplificada de velocidad del Ascensor. . . . .	105
10.1. Gráfica: Uso diario promedio del ascensor. . . . .	116
10.2. Gráfica: Uso semanal promedio del ascensor. . . . .	116
10.3. Gráfica: Uso semanal promedio del ascensor - días hábiles vs. fin de semana. . . . .	117
10.4. Gráfica: respuesta a la pregunta <i>¿Con qué frecuencia al día utiliza el ascensor? - Residenciales.</i> . . . . .	118
10.5. Gráfica: respuesta a la pregunta <i>¿Con qué frecuencia al día utiliza el ascensor? - Oficinas.</i> . . . . .	118
10.6. Gráfica: Carga promedio semanal del ascensor - Días de semana. . . . .	119
10.7. Gráfica: Carga promedio semanal del ascensor - Fines de semana. . . . .	119
10.8. Gráfica: Pisos recorridos. . . . .	120
10.9. Gráfica: Cantidad de viajes diarios Febrero vs. Marzo. . . . .	121
10.10 Gráfica: Carga promedio en Marzo. . . . .	122
11.1. Resultado del ensayo simulado sin carga - Edificio #1. . . . .	126
11.2. Resultado del ensayo simulado con tres personas - Edificio #1. . . . .	127
11.3. Diagrama de flujo de los programas utilizados para estimar la potencia	129
11.4. Encuesta - uso del ascensor debido al COVID-19. . . . .	135
11.5. Tabla de potencias instantáneas de generación en Uruguay, 17/5/21 15:37. Fuente [30]. . . . .	137
11.6. Gráfica de suministro a la demanda de Uruguay. Fuente [30]. . . . .	138



Esta es la última página.  
Compilado el martes 17 agosto, 2021.  
<http://iie.fing.edu.uy/>