



Trabajo Fin de Grado

Caracterización de un ascensor desde el punto de vista energético
y de eficiencia. Definición ciberfísica y OEEE

Characterization of an elevator from the energy and efficiency
perspective. Cyber-Physical definition and OEEE

Autor

Iván García Rica

Directora

Sonia Val Blasco

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

ESCUELA DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA
2024/2025

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado propone el diseño y definición del Overall Equipment Effectiveness for Elevators (OEEE), un nuevo KPI (Key Performance Indicator) que adapta la metodología del conocido OEE al análisis energético y operativo de ascensores. En un contexto alineado con la Industria 4.0 y los sistemas ciberfísicos (CPS), el OEEE permite evaluar la eficiencia de estos sistemas, incorporando parámetros de disponibilidad, rendimiento, calidad y eficiencia energética.

Para ello, se realiza una caracterización de un ascensor basada en la normativa vigente, considerando tanto sus componentes como sus modos de funcionamiento. A partir de esta base, se definen seis indicadores que conformarán el OEEE, permitiendo detectar ineficiencias operativas y/o energéticas. Posteriormente, se evalúa su metodología de cálculo mediante una simulación realista, complementada con la descripción de los sistemas de regeneración de energía para ascensores.

De esta forma, el trabajo presenta el OEEE como una herramienta que busca optimizar el rendimiento y la eficiencia energética de los ascensores, alineándola con la sostenibilidad y la reducción del impacto económico y medioambiental que conllevan los grandes consumos de energía.

Abstract

This Final Degree Project proposes the design and definition of the Overall Equipment Effectiveness for Elevators (OEEE), a new Key Performance Indicator (KPI) that adapts the methodology of the well-known OEE to the energy and operational analysis of elevators. In a context aligned with Industry 4.0 and Cyber-Physical Systems (CPS), the OEEE enables the evaluation of the efficiency of these systems by incorporating parameters such as availability, performance, quality, and energy efficiency.

To achieve this, an elevator is characterized based on current regulations, taking into account both its components and operating modes. Based on this foundation, six indicators are defined to compose the OEEE, allowing the detection of operational and/or energy inefficiencies. Its calculation methodology is then evaluated through a realistic simulation, which is complemented by the description of energy regeneration systems for elevators.

In this way, the project presents the OEEE as a tool aimed to optimize the performance and energy efficiency of elevators, aligning it with sustainability and the reduction of the economic and environmental impact associated with high energy consumption.

Índice

1. Introducción	7
2. Objetivos	10
3. Marco teórico	11
3.1. Estado del arte	11
3.2. Fundamentos del OEE.....	12
4. Caracterización del ascensor	17
4.1. Clasificación por uso	17
4.2. Tipo de sistema.....	17
4.3. Componentes principales	18
4.4. Modos de funcionamiento	20
5. Definición del OEEE	22
5.1. Fundamento teórico.....	22
5.2. Cálculo del OEEE	24
6. Evaluación del OEEE	29
6.1. Sistemas de regeneración energética y su impacto en el consumo.....	34
7. Conclusión	38
Bibliografía	40
Índice de figuras	43
Índice de tablas	45

1. Introducción

En los últimos años, se ha desarrollado exponencialmente la tecnología en todos los ámbitos y, de esta forma, la industria ha ido adoptando nuevos métodos. Durante la actual era de la información, los datos han sido el principal activo buscado por cualquier compañía de cara a ganar algún tipo de ventaja en la industria. Ahora, ha surgido un nuevo concepto de “industria inteligente”, en el que “máquinas inteligentes” o “procesos inteligentes” aprenden directamente de los datos, para optimizar continuamente un proceso con muy poca intervención humana (Jan et al., 2023)

Así pues, mediante este nuevo uso de la información y los datos, se puede comenzar a hablar de la cercanía de una nueva revolución industrial, denominada *Industria 4.0* (Ryalat, Elmoaqet y Alfaouri, 2023).

La *Industria 4.0* busca digitalizar y automatizar cualquier proceso productivo, de forma que, al crear sistemas inteligentes, estos sean capaces de adaptarse a diferentes situaciones en tiempo real o tomar decisiones de manera autónoma, y por tanto poder llegar a optimizar recursos, mejorar la eficiencia o cualquier personalización oportuna.

Para llegar a lograr esta autonomía, es necesario que haya una estructura adecuada en el sistema. El principal componente es el Sistema Ciber Físico (*Cyber Physical System, CPS*), que integra un conjunto de componentes físicos y cibernéticos. La red física consiste en componentes de la infraestructura interconectados y la red cibernética en controladores inteligentes unidos entre sí (Marinagi et al., 2023).

Los CPSs consiguen su integración gracias al *Internet of Things (IoT)* (Marinagi et al., 2023), que mediante la conexión de todos estos sistemas permite la transmisión de los datos generados en tiempo real, para su posterior procesamiento. Estos datos, generados a raíz de variables declaradas en función de la información que se desee obtener, servirán para definir cualquier *Key Performance Indicator (KPI)* (Marinagi et al., 2023).

Los KPIs, como indica su nombre, son indicadores que permiten medir el desempeño de un sistema, ya sea en términos de rendimiento, eficiencia o cualquier parámetro relevante, usando todas las variables que hayan sido previamente declaradas. De esta forma, teniendo los indicadores necesarios, es de vital importancia tener la capacidad de procesarlos y poder usarlos para realizar los cambios pertinentes en el proceso.

El procesamiento se lleva a cabo mediante la *Inteligencia Artificial (IA)*, que mediante el cálculo de los KPIs previamente definidos y gracias al *machine learning (ML)*, el sistema podrá “aprender” directamente de los datos de dichos resultados, para saber qué parámetros se deberían modificar para llegar al caso deseado.

En la figura 1, podemos observar el esquema del uso de los datos en tiempo real en sistemas en la Industria 4.0.

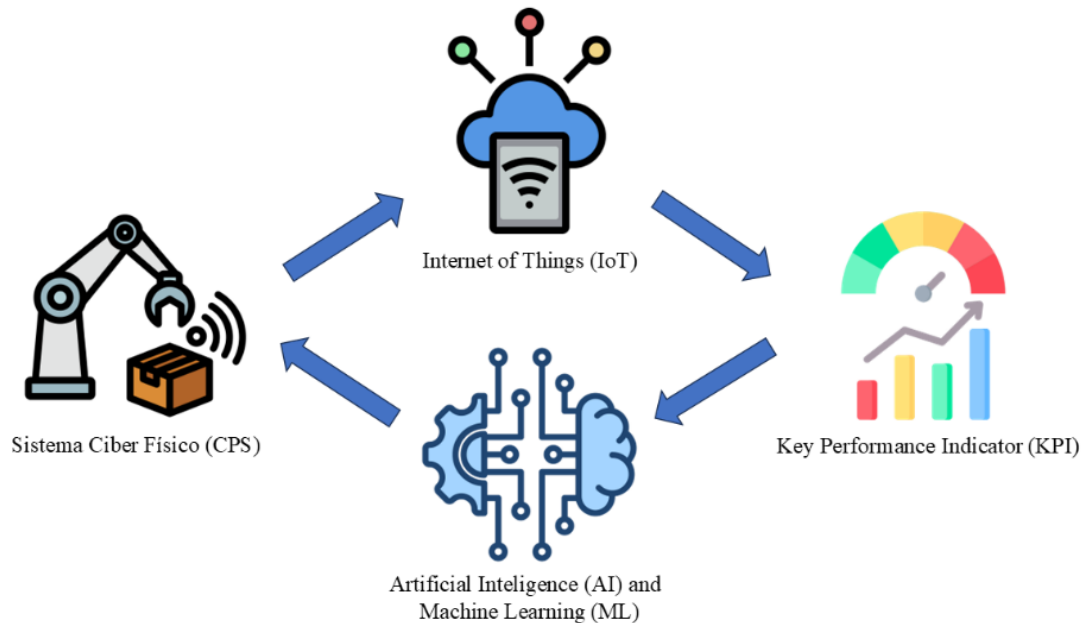


Figura 1. Uso de los datos en tiempo real en la Industria 4.0. Fuente: Elaboración propia

Este nuevo funcionamiento de la información, resulta revolucionario y marca un antes y un después en toda la historia de la industria, representa el fundamento de una era en la que los datos son un bien muy valioso y que nos sirven para analizar y optimizar cualquier tipo de proceso.

El presente trabajo se va a centrar en una única parte de este conjunto, los KPIs, ya que cada uno conlleva estudios muy específicos, que posteriormente se unen entre sí para formar el sistema completo.

En este caso, la investigación se dedicará a diseñar y definir un conjunto de KPI con el fin de optimizar los procesos de un ascensor desde el punto de vista energético y de eficiencia. Este va a ser el *Overall Equipment Effectiveness for Elevators (OEEE)*. El OEEE consistirá en una adaptación del *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*, que es un concepto comúnmente usado en el sector industrial para medir la productividad y eficiencia de procesos. Es un indicador esencial para situaciones en las que se desea conocer puntos débiles o posibles ineficiencias, e implementar medidas de mejora (Les et al., 2024), y ha sido ampliamente aceptado gracias a su capacidad para ofrecer información valiosa y aplicable sobre los procesos operativos (Ullah et al., 2023).

El OEEE estará basado en la teoría del OEE, las Six Big Losses, definidas por Nakajima (Ng Corrales et al., 2022), que será posteriormente desarrollada y detallada, y que servirá de gran ayuda para diseñar nuestro KPI.

El hecho de desarrollar un KPI para el caso específico de los ascensores, viene debido a la necesidad de optimizar el consumo energético de los edificios, donde la energía consumida por los ascensores constituye entre el 2% y el 10% del consumo total del edificio (Elevator World, s.f.). Por lo que, una reducción del consumo en dichos sistemas, conllevaría una gran diferencia en consumo total, y por tanto se reducirían gastos, además de la reducción respecto al impacto medioambiental.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar un conjunto de KPIs, basados en los fundamentos del Overall Equipment Effectiveness (OEE) que, aplicándose al caso específico de un ascensor, se denominará Overall Equipment Effectiveness for Elevators (OEEE) y permitirá evaluar y optimizar la eficiencia y el consumo energético de los ascensores.

Para ello, se plantean los siguientes objetivos detallados:

- Analizar los fundamentos del OEE y sus aplicaciones.
- Caracterizar el funcionamiento de los ascensores desde una perspectiva operativa y energética.
- Identificar las variables y parámetros clave que puedan incidir en la optimización del ascensor.
- Diseñar un modelo del OEEE adaptado a estos parámetros del ascensor.
- Proponer un método de cálculo del OEEE y evaluar su utilidad como KPI.

De esta manera, el presente Trabajo de Fin de Grado estará estructurado de la siguiente forma: en la Sección 3 se estudiará el estado del arte y se detallarán los estudios previos sobre el OEE. En la Sección 4 se realizará la caracterización del ascensor en la que se declararán todos los componentes y variables implicados en el cálculo del OEEE. En la Sección 5 se definirá el OEEE y se diseñará por completo. En la sección 6, se evaluará el OEEE, presentando una simulación de su cálculo, y una posible solución a la optimización energética en los ascensores. Finalmente, en la Sección 7 se obtendrán las conclusiones de este estudio y las posibles líneas de desarrollo que podrían continuarlo.

3. Marco teórico

3.1. Estado del arte

En los años recientes, se han desarrollado múltiples estudios centrados en la aplicación de KPIs a diferentes campos, y no solo en contextos industriales o ingenieriles, sino que es una herramienta que de aquí en adelante nos será útil en absolutamente cualquier materia.

El OEE no se queda atrás, pues con dicho crecimiento de los KPIs, ha visto enormemente incrementado sus usos, además, han aparecido nuevas extensiones y adaptaciones, para ajustarse perfectamente a cualquier situación que se desee optimizar.

Puesto que, en este trabajo, para diseñar el OEEE, se va a realizar una adaptación del OEE, este apartado se va a centrar en revisar los estudios basados en otras adaptaciones de este KPI. El OEE fue diseñado para entornos de producción, por lo que la mayoría de sus estudios están relacionados con ello, pero existen varias evidencias de estas extensiones. No muy lejos de esta aplicación, Madreiter y Ansari, (2024) definen el OSEE (Overall Sustainable Equipment Effectiveness) que modifica el OEE para incorporar aspectos ecológicos y sociales relevantes a procesos de producción y mantenimiento.

Les et al., (2024) diseñan el OEEM (Overall Equipment Effectiveness for Mobility), donde adaptan el OEE para las necesidades del transporte urbano de mercancías, en el que miden su eficiencia o desempeño. Relacionado también con la logística, Ng Corrales et al., (2022) adaptan el OEE para diseñar el OPE (Overall Process Effectiveness), diseñado para evaluar procesos de carga y descarga de camiones, y centrado en identificar pérdidas ocultas y actividades que no aportan valor en operaciones de descarga.

Cambiando completamente de materia, Féres y Estanislau Neto, (2023) diseñan el ODE (Overall Drilling Effectiveness), siendo una adaptación del OEE usado en el análisis de desempeño de la industria minera, en concreto aplicado a la perforación de rocas. Esto son ejemplos de dichas extensiones, no son todos, ya que hay aplicaciones en cientos de campos distintos, y gracias a sus extensos estudios se podrán usar en cierta manera como guía para enfocar los ajustes al OEE y, por tanto, el diseño del OEEE.

Por otra parte, con el avance de la Industria 4.0, algunos trabajos han incorporado CPS y el uso de sensores para la monitorización en tiempo real del comportamiento de sistemas, permitiendo una caracterización más precisa y dinámica (Ryalat, Elmoaqet y Alfaouri, 2023). Sin embargo, la mayoría de estos estudios se centran en líneas de producción y no en otros campos como los ascensores, revelando así un vacío en la literatura.

De esta manera, se puede afirmar que no existe evidencia previa de algún estudio en el que se modifique el OEE para ajustarlo al caso específico de un ascensor, aunque sí consta la

elaboración de algún KPI relacionado con este aspecto, como Esteban et al., (2023), quienes, mediante el uso de diferentes KPIs, buscan analizar las acciones de mantenimiento en instalaciones de ascensores.

Por tanto, este trabajo propone una caracterización de un ascensor, basándose en el OEE, para poder optimizar su energía y eficiencia, aportando un punto de vista y un estudio diferente al campo de los ascensores, alineándolo con la perspectiva de la Industria 4.0, a la que el mundo tecnológico está encaminado.

3.2. Fundamentos del OEE

El OEE es una herramienta sencilla, utilizada en la gestión de equipos y la estimación de su eficiencia (Féres y Estanislau Neto, 2023). Considerando el número de artículos científicos publicados en los últimos años, el papel del OEE en los ámbitos industrial y científicos parece claro y bien reconocido: las publicaciones científicas sobre el *Overall Equipment Effectiveness* y la mejora del propio indicador están en aumento (Luzzo, Starnoni y Schiraldi, 2023).

El OEE es un punto de referencia y una base para evaluar, comparar y seguir el progreso del rendimiento de un determinado activo de producción con respecto a los estándares del sector, es decir, uno de los KPIs más consolidados cuando se trata de medir el rendimiento en los ámbitos de la fabricación y el mantenimiento a nivel operativo (Madreiter y Ansari, 2024).

Este fue introducido por Nakajima en 1988 en el contexto de *Total Productive Maintenance (TPM)*, midiendo la productividad basada en las pérdidas (Madreiter y Ansari, 2024). Para Nakajima, TPM es un programa operativo y diseñado para maximizar la eficiencia de los equipos durante toda su vida útil (Chaurey et al., 2021). Este programa estaba compuesto por tres principios interconectados: la maximización de la eficiencia del equipo, mantenimiento autónomo de los operarios y actividades en pequeños grupos (Ullah et al., 2023).

TPM es un sistema único, y su estructura está basada en las siguientes categorías (Chaurey et al., 2021), las cuales están ampliamente relacionadas con los tres principios nombrados previamente:

a) Mantenimiento planeado: está dividido en mantenimiento preventivo (*preventive maintenance, PM*), mantenimiento correctivo (*corrective maintenance, CM*) y mantenimiento de prevención (*maintenance prevention, MP*). Su objetivo es hacer equipamiento y maquinaria libres de problemas, ya que estos producirían productos libres de defectos y conseguir así la satisfacción del cliente. El mantenimiento planeado es una acción para mantener el equipo en condiciones operativas, términos de inspección, detección y prevención de fallos. Esto puede ser descrito como una especie de control del equipo antes de poder resultar en una rotura (Chaurey et al., 2021).

b) Mantenimiento de calidad: el objetivo es satisfacer al cliente mediante la más alta calidad, a través de una producción sin defectos. El enfoque se centra en eliminar las no conformidades de forma sistemática, comprendiendo qué partes del equipo afectan a la calidad del producto, eliminando los problemas de calidad actuales y abordando después los problemas potenciales (Chaurey et al., 2021).

c) Educación y entrenamiento: los operadores reciben educación para mejorar sus habilidades, donde el objetivo es contar con empleados polivalentes con una moral alta, con la determinación de trabajar y realizar todas las funciones necesarias de forma efectiva e independiente, afectando a la calidad de la producción (Chaurey et al., 2021).

Estos principios contribuyen directamente al OEE, ya que tienen una influencia total en el rendimiento operativo de un equipo. De esta forma, este puede verse como una amalgama entre la operación, el mantenimiento, y la gestión del equipo de producción y recursos (Ullah et al., 2023).

Sin embargo, para entender el OEE, es necesario identificar qué factores afectan negativamente a este indicador, es decir, las pérdidas. De acuerdo con dichos estudios de Nakajima acerca de TPM, el cálculo del OEE estaba directamente basado en el concepto de las “six big losses”, divididas en tres diferentes categorías (Ng Corrales et al., 2022), recogidas en la figura 2:

- Availability (Disponibilidad).
- Performance (Rendimiento).
- Quality (Calidad).

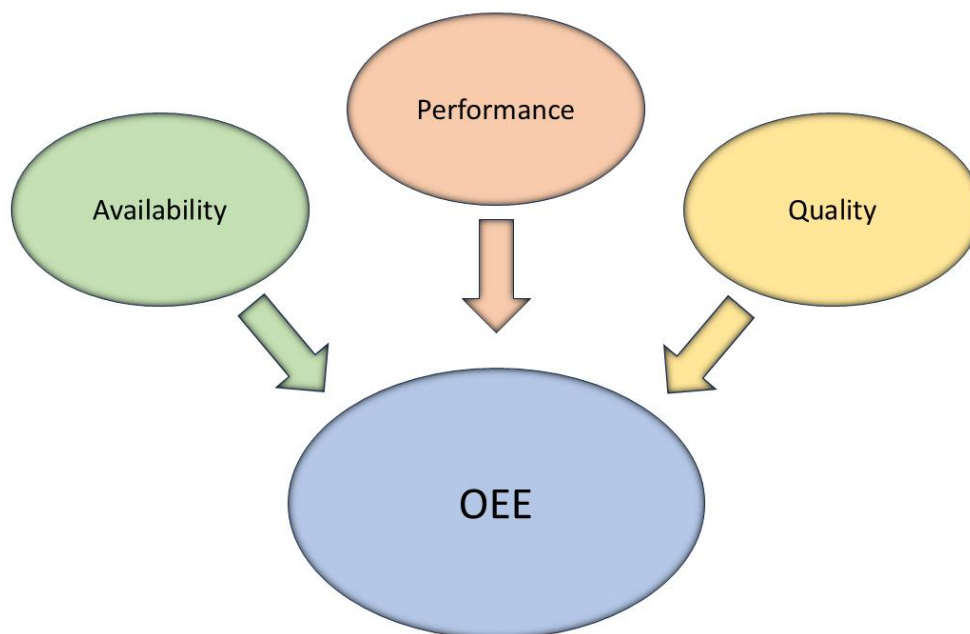


Figura 2. Componentes del OEE. Fuente: Elaboración propia

El OEE entonces, es el resultado de la multiplicación de los tres parámetros, cada uno calculado de forma individual.

$$OEE(\%) = Availability \times Performance \times Quality$$

En los últimos años ha habido controversia al considerar las variables necesarias para estos parámetros (Ng Corrales et al., 2022), pero este trabajo se va a centrar en la definición de Nakajima (1988), en la que a través de las “six big losses”, de las cuales corresponden dos pérdidas a cada parámetro, detalla, de forma general, para un sistema:

a) Disponibilidad (Availability)

Mide el tiempo que el equipo está realmente disponible para producir, en comparación con el tiempo programado para operar (Ullah et al., 2023).

$$Disponibilidad = \frac{Tiempo\ de\ producción}{Tiempo\ programado}$$

Factores que influyen en la disponibilidad (Ng Corrales et al., 2022, Rakes et al., 2024):

- Fallos o averías del equipo que provocan pérdida de tiempo y calidad, como la rotura de un componente mecánico.
- Pérdidas de tiempo debido al cambio de producto o configuración al finalizar un lote y comenzar otro.

b) Rendimiento (Performance)

Mide la velocidad operativa verdadera en comparación con la velocidad ideal (Ullah et al., 2023).

$$Rendimiento = \frac{Ciclo\ ideal \times Piezas\ totales}{Tiempo\ de\ producción}$$

Factores que influyen en el rendimiento (Ng Corrales et al., 2022, Rakes et al., 2024):

- Inactividad y paradas menores debido a interrupciones por mal funciones temporales o que la máquina esté sin producir, debido por ejemplo a atascos.
- Diferencia entre la velocidad de diseño de la máquina y la velocidad real de operación, teniendo un movimiento lento debido por ejemplo a cargas excesivas o desgastes en el sistema.

c) Calidad (Quality)

Mide la proporción de unidades que cumplen con el estándar en comparación con la producción total (Ullah et al., 2023).

$$Calidad = \frac{Piezas\ buenas}{Piezas\ totales}$$

Factores que influyen en la calidad (Ng Corrales et al., 2022, Rakes et al., 2024):

- Bajo rendimiento inicial por pérdidas desde el arranque hasta la estabilización del proceso, como producciones fuera de tolerancia tras el encendido.
- Pérdidas por productos defectuosos que necesitan reprocesarse o desecharse.

Estas pérdidas se refieren a un OEE industrial, puesto que la teoría puede aplicarse a cualquier campo, y siempre se estaría hablando de un proceso.

Este KPI ha sido ampliamente adoptado en la industria debido a su visión global del desempeño, combinando así los tres parámetros nombrados en un mismo indicador, y permitiendo así una visión completa del equipo que se esté analizando. Se trata de un indicador que, al estar compuesto por varias ramas, facilita focalizar los puntos débiles y fuertes, de cara a aportar soluciones, así como una herramienta muy manejable, con cálculos sencillos, interpretable por operarios o técnicos, y que puede servir como base para desarrollar nuevos KPIs más específicos. También, permite una mejora continua, con seguimiento constante, lo que permite un enfoque claro a largo plazo.

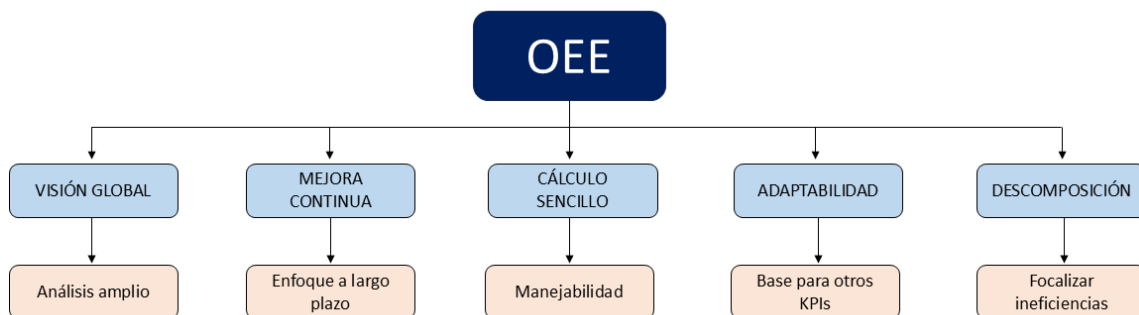


Figura 3. Ventajas OEE. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se pueden ver las principales ventajas de los OEE, desde un punto de vista general:

a) Visión global: permite obtener una visión completa del desempeño del sistema, integrando disponibilidad, rendimiento y calidad en un solo valor, ofreciendo así un análisis amplio y dispuesto de forma clara.

b) Mejora continua: al identificar pérdidas de eficiencia, promueve un enfoque de mejora a largo plazo, de cara a minimizar pérdidas y optimizar los procesos.

c) Cálculo sencillo: sus métodos de cálculo son simples, incluyendo datos operativos básicos y permite su uso a distintos niveles sin necesidad de herramientas complejas, de forma que resulta fácil su manejabilidad e interpretabilidad.

d) Adaptabilidad: aunque tenga más uso en el sector industrial, no es su único campo, ya que permite adaptarse en distintos sectores y contextos, o incluso servir como base para diseñar nuevos KPIs, como es el caso del actual trabajo.

e) Descomposición: al analizar los parámetros de forma separada (disponibilidad, rendimiento y calidad), permite la identificación más específica de las ineficiencias del sistema.

Sin embargo, el OEE presenta ciertas limitaciones, pues fue diseñado con un enfoque industrial clásico, y al ser desarrollado para líneas de producción, no es exactamente aplicable tal y como es, a casos más específicos. A su vez, el OEE no considera el consumo energético, ni distingue causas externas, es decir, no diferencia entre paradas debidas al equipo o al entorno (como la falta de demanda o el uso discontinuo en un edificio, para el caso de un ascensor).

Es por ello, que, para la situación específica de un ascensor, este trabajo se va a enfocar en el diseño del Overall Equipment Effectiveness for Elevators (OEEE), partiendo de una base facilitada por los fundamentos básicos del OEE, pero con diferencias que faciliten la adaptabilidad del KPI a los distintos parámetros que se van a analizar.

El diseño del OEEE no solo representa una simple adaptación del OEE, sino que supone un avance considerable al incorporar variables y parámetros específicos del funcionamiento de un ascensor, más concretamente desde una perspectiva energética y de eficiencia. Esto permitirá identificar ineficiencias operativas y optimizar el consumo de energía contribuyendo así a los objetivos actuales de sostenibilidad y eficiencia en el entorno urbano. Además, al incluir conceptos relacionados con la Industria 4.0, como la monitorización en tiempo real, empezando con un CPS, y el análisis de datos, que se llevaría a cabo al poner el KPI en práctica, el OEEE se posiciona como una herramienta innovadora, que puede abrir nuevas líneas de investigación y aplicación en estudios del sector de la movilidad vertical, así como servir de ejemplo o referencia para otros estudios en los que se desee realizar una optimización en un sector diferente.

4. Caracterización del ascensor

Con el fin de aplicar el indicador OEEE, es necesario caracterizar el ascensor sobre el que se desarrollará la propuesta. Para ello, se va a seguir unos criterios normativos establecidos, especialmente los recogidos en la norma UNE-EN ISO 25745-2:2015. A continuación, se describen sus principales características, componentes y condiciones operativas que servirán para diseñar el nuevo KPI y aplicarlo.

4.1. Clasificación por uso

Según la tabla A.1 de la norma UNE-EN ISO 25745-2:2015, el ascensor en este estudio se clasifica en la categoría de uso 5, con una frecuencia de uso ‘Muy alta’ y una estimación de entre 1000 y 2000 viajes diarios, operando 360 días al año. Dicha categoría, según la norma, conlleva una velocidad nominal de 2,5 m/s. Este nivel de uso equivaldría, por ejemplo, a un edificio grande de oficinas, e implica una alta exigencia tanto en términos operativos como energéticos, y es por ello que se ha elegido para este trabajo, puesto que una buena optimización será un aspecto clave para ofrecer un servicio eficiente y duradero, así como controlar el gran consumo energético que supone. En la figura 4 se observa la clasificación por categorías:

Categoría de uso	1	2	3	4	5	6
Intensidad/frecuencia de uso	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Extremadamente alto
Número de viajes por día (n_d) (rango típico)	50 (< 75)	125 ($75 \leq 200$)	300 ($200 \leq 500$)	750 ($500 \leq 1\,000$)	1 500 ($1\,000 \leq 2\,000$)	2 550 ($\geq 2\,000$)

NOTA El número de viajes se clasifica para permitir resultados comparables en las evaluaciones de energía realizadas por diferentes partes.

Figura 4. Tabla A-1. Clasificación por el número de viajes por día. Fuente: UNE-EN ISO 25745-2:2015.

4.2. Tipo de sistema

El ascensor usado para este estudio es un sistema de tracción por adherencia con cuarto de máquinas superior, una tipología común en edificios de uso intensivo. En estos sistemas, el movimiento de la cabina se logra mediante un motor eléctrico de tracción que acciona una polea motriz. Sobre ella, se apoyan los cables de suspensión, que están conectados por un lado a la cabina y por otro al contrapeso, quien se encargará de equilibrar la masa de la cabina, de forma que reduzca lo máximo la implicación del motor en según qué movimientos, y por tanto el consumo.

El sistema se basa en el principio de adherencia por fricción entre los cables y la polea, de forma que, cuando el motor gira, la tracción generada desplaza la cabina y el contrapeso, en sentidos opuestos. En la figura 5 se puede observar un diagrama que representa dicho sistema.

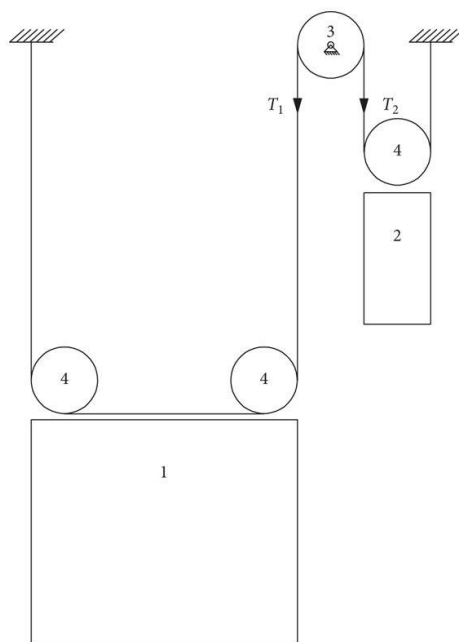


Figura 5. Diagrama de un sistema de tracción. Fuente: (Peng et al., 2018)

En la figura 5, se distinguen cinco componentes del sistema de tracción: (1) cabina, encargada de transportar verticalmente a los pasajeros o mercancía, (2) contrapeso, encargado de equilibrar parcialmente la carga de la cabina para reducir el trabajo del motor y facilitar el movimiento de la cabina, (3) polea motriz, transmite el movimiento del motor a la cabina y al contrapeso mediante fricción, (4) poleas, conectadas a la polea motriz mediante los cables de suspensión permiten el movimiento de la cabina y contrapeso, (T1 y T2) cables de suspensión, soportan el peso de la cabina y contrapeso permitiendo su movimiento.

La ubicación del cuarto de máquinas en la parte superior del hueco del ascensor permite una instalación más directa del motor y de la polea, mejorando la transmisión y reduciendo las pérdidas mecánicas. Además, para este trabajo resulta oportuno, ya que su accesibilidad facilita la extracción de datos y su mantenimiento.

4.3. Componentes principales

La instalación está compuesta por los siguientes elementos técnicos claves, que servirán para entender el funcionamiento de esta. Aunque no vayan a ser directamente utilizados para el diseño del OEEE, sí que serán clave para entender el funcionamiento del ascensor y los posibles fallos mecánicos que podrán interferir con un correcto funcionamiento.

- Motor de tracción: acciona la polea motriz mediante energía eléctrica. Es el principal responsable del consumo energético durante los desplazamientos, y servirá para sacar datos de consumo energético para el cálculo del OEEE.
- Cuadro de maniobra: controla todos los aspectos operativos del ascensor: arranque y parada, gestión de llamadas, control de puertas, medidas de seguridad, etc. Servirá

para extraer información de variables como número de viajes, tiempos de parada o número de incidencias.

- Polea motriz, poleas y cables de suspensión: transmiten el movimiento del motor a la cabina y al contrapeso mediante fricción. Su mantenimiento afecta la eficiencia de transmisión y el comportamiento dinámico del sistema.
- Cabina: elemento destinado al transporte de personas o carga. Su masa, con la de la carga, determinarán la carga total del sistema y por tanto, afectará directamente al consumo energético.
- Contrapeso: equilibra parcialmente la masa de la cabina, lo que reduce el trabajo del motor. Una relación de contrapeso adecuada permite mejorar la eficiencia energética del sistema. Suele diseñarse con un peso en torno al 50% de la carga máxima permitida en la cabina.
- Guías: estructuras metálicas verticales que aseguran el desplazamiento estable de la cabina y el contrapeso. Su alineación y estado de mantenimiento pueden influir en el consumo por aumento de fricción.
- Sensores de final de carrera y de carga, y sistemas de control de posición: permiten la detección de llegada a planta, activación precisa de frenos, el control del nivelado de la cabina y la detección de la carga, que podrá servir para los cálculos del OEEE.
- Paracaídas, amortiguadores y limitador de la velocidad: sistemas de seguridad que actúan en casos de exceso de velocidad o caída libre. Aunque no afectan al consumo, son esenciales para un funcionamiento seguro.
- Sistemas auxiliares: elementos como iluminación, ventilación o pantallas, consumen energía de forma constante, incluso en estado de espera (*standby*).

En la figura 6 se puede observar una figura donde se detallan las partes más importantes y que pueden influir en el rendimiento mecánico de un ascensor:

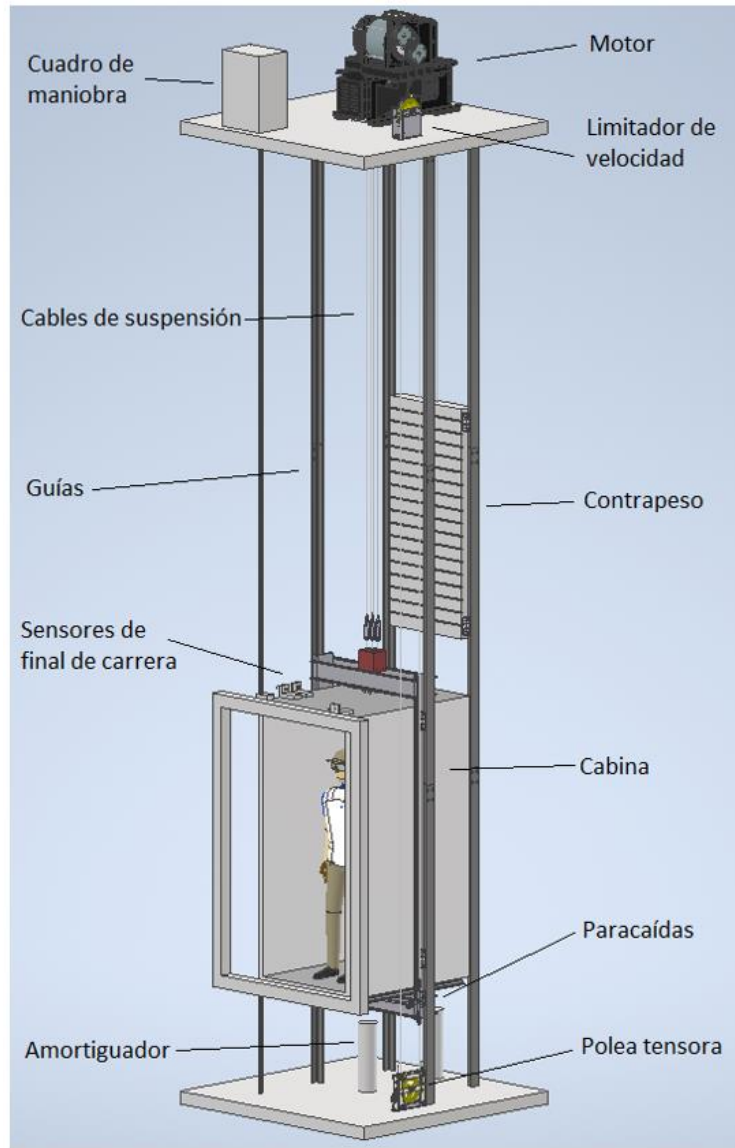


Figura 6. Componentes del ascensor. Fuente: Elevator world y elaboración propia.

4.4. Modos de funcionamiento

Para entender el consumo durante el movimiento del ascensor, es de vital importancia definir y entender los diferentes modos de operación que existen desde el punto de vista energético. El consumo energético varía según el tipo de movimiento: subida o bajada, y si lo hace con carga o sin carga, afectando directamente a los distintos cálculos del OEEE.

En la figura 7, se pueden observar los cuatro casos diferentes, en los que, según la carga, se favorece el movimiento de la cabina o, al contrario.

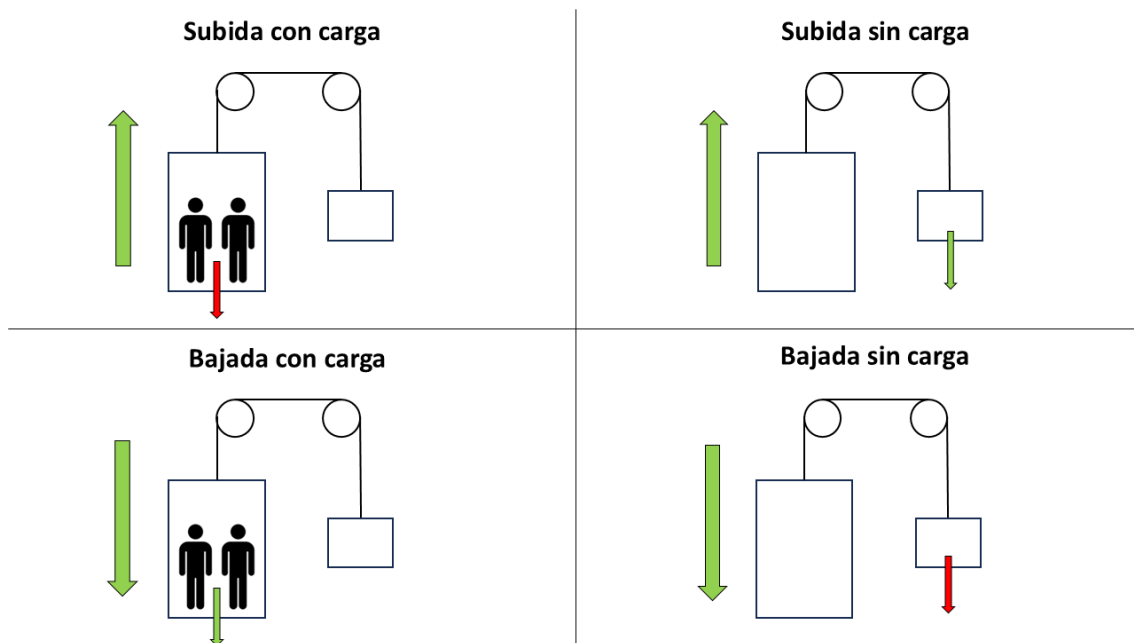


Figura 7. Modos de funcionamiento del ascensor. Fuente: Elaboración propia

- a) Subida con carga: la cabina pesa más que el contrapeso, por lo que el motor realiza el trabajo de levantar la diferencia de peso entre ambos. Este modo es el que mayor gasto energético conlleva para el motor.
- b) Subida sin carga: el contrapeso pesa más que la cabina, por lo que baja por gravedad, provocando la subida de la cabina. En este caso, el motor tiene que actuar como freno activo, para controlar la velocidad y la parada de la cabina, de forma que consume energía, aunque de forma muy baja.
- c) Bajada con carga: la cabina pesa más que el contrapeso, por lo que es esta la que baja por gravedad. Otra vez, el motor debe actuar como freno activo, produciendo un consumo energético muy bajo.
- d) Bajada sin carga: el contrapeso pesa más que la cabina, por lo que, para bajar la cabina, el motor tiene que realizar el trabajo de subir la diferencia entre el peso de la cabina y el contrapeso. De esta forma, en este caso se tiene de nuevo un consumo alto en el motor.

5. Definición del OEEE

5.1. Fundamento teórico

El indicador OEEE (Overall Equipment Effectiveness for Elevators) se propone como una herramienta para evaluar de forma integral la eficiencia energética y operativa de un ascensor, adaptando la lógica del ya estudiado OEE (Overall Equipment Effectiveness) a un contexto nuevo y específico como la movilidad vertical.

El OEEE se alinea con el concepto de sostenibilidad de la triple-bottom-line: económico, social y medioambiental (Les et al., 2024). Busca optimizar bien sea detectando desgastes mecánicos, ineficiencias energéticas o de servicio, que resultan en una reducción del gasto energético, implicando así una mejora económica y medioambiental. Por consecuencia, la optimización del servicio también afectaría a la experiencia del usuario y, por tanto, estaría implicado en el aspecto social. En la figura 8, se observa una ilustración relacionada con la triple-bottom line:

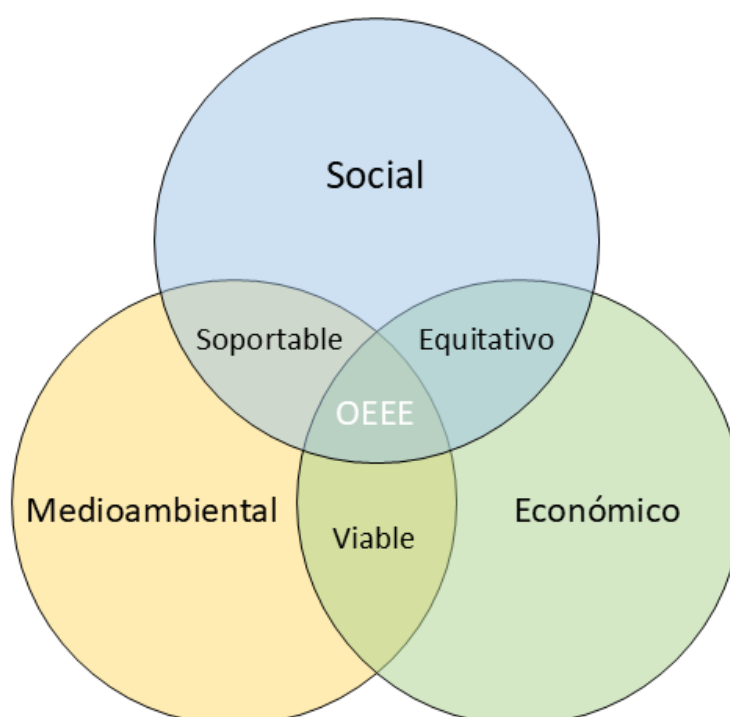


Figura 8. Diagrama de Venn para OEEE. Fuente: Elaboración propia

El diseño del OEEE, como ya ha sido comentado en el marco teórico, se va a llevar a cabo basado en la teoría de las six big losses de Nakajima (1988), aplicada en el OEE, compuestas por dos pérdidas de cada parámetro: Disponibilidad, Rendimiento y Calidad (Ng Corrales et al., 2022).

Esta teoría es meramente industrial y está pensada para procesos de producción, por lo que, para la situación específica de un ascensor, en la que tampoco hay una metodología existente

para su análisis, es de gran ayuda, pero es necesario realizar las adaptaciones necesarias para lograr los objetivos marcados para este KPI.

Uno de los objetivos, y muy importante, es detectar ineficiencias energéticas en el funcionamiento del ascensor, de cara a optimizar y reducir el gasto energético innecesario. Esta faceta no está contemplada en las six big losses, puesto que son puramente de carácter productivo, por lo que se añade un nuevo parámetro, denominado *Eficiencia Energética*.

Este parámetro permite abordar la eficiencia energética como una dimensión propia, puesto que va separado del análisis operativo, proporcionando así una visión más completa del comportamiento del sistema. La clave está en que un ascensor puede comportarse de manera muy eficiente en cuanto a disponibilidad, rendimiento y calidad, pero que su consumo energético no esté bien optimizado, por lo que esta medida asegura un análisis del sistema completo, y al estar desglosado en diferentes parámetros, siempre se tendrá la capacidad de detectar en cuál de ellos puede existir cualquier ineficiencia.

Por tanto, añadiendo este parámetro a los tres que ya estaban incluidos en el OEE, obtenemos la estructura principal sobre la que se basará el nuevo KPI diseñado. El OEEE está compuesto entonces, por seis indicadores, divididos en cuatro bloques según los nombrados parámetros: Disponibilidad, Rendimiento, Calidad y Eficiencia Energética. En la figura 9, se observan los bloques e indicadores que componen el OEEE:



Figura 9. Componentes del OEEE. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Cálculo del OEEE

Una vez definidos los fundamentos de este nuevo KPI, esta sección está enfocada a desarrollar su metodología de cálculo, donde se detallará la definición teórica y las especificaciones de cada indicador. Para ello, se utilizará un formato inspirado en el modelo estandarizado por la norma ISO 22400 para la documentación de KPIs, siguiendo la estructura aplicada por Les et al., (2024).

5.2.1. Disponibilidad

Este indicador viene a ser prácticamente igual al del OEE, el cual mide el tiempo que el equipo está realmente disponible para producir, en comparación con el tiempo programado para operar (Ullah et al., 2023). Por lo que, haciendo la analogía del equipo de producción con el ascensor, podemos hacer la equivalencia al tiempo que está el ascensor realmente disponible para el servicio, en comparación con el tiempo programado para estar al servicio a lo largo de la referencia que se desee.

Como tiempo programado para estar al servicio, hay que detallar que no cuenta aquel destinado a puro mantenimiento, que no haya sido por cualquier anomalía en el funcionamiento. Como tiempo realmente disponible se tienen en cuenta todas las paradas no planificadas bien sea por averías, fallos eléctricos, emergencias o intervenciones imprevistas, para restarlo al tiempo programado.

El indicador actual permite analizar si el ascensor tiende a perder mucho tiempo de servicio, que pueda ser ocasionado por estas paradas no planificadas de forma repetitiva, permitiendo así detectar carencias en la disponibilidad del ascensor para sus usuarios. Este indicador está definido en la tabla 1.

Tabla 1. Indicador Disponibilidad

Indicador		Unidades
Disponibilidad (D)		%
Descripción	Muestra el % del tiempo programado que el ascensor está disponible	
Fórmula	$D = [1 - (TP/(TR-TM))] * 100$	
Variable	Unidades	Descripción
TiempoReferencia (TR)	Minutos	Tiempo de referencia.
TiempoMantenimientos (TM)	Minutos	Tiempo programado de mantenimiento del ascensor.
TiempoParadas (TP)	Minutos	Tiempo sin servicio por paradas no programadas.

5.2.2. Energía Convertida

Este indicador es clave para analizar el rendimiento mecánico del ascensor. Mide la energía desarrollada por el motor que realmente se está convirtiendo de forma útil para el movimiento del sistema, es decir, la eficiencia de conversión. De esta manera, se pueden detectar

de manera muy sencilla las pérdidas de energía ocasionadas por fricción, desalineación o desgaste de los componentes responsables del movimiento del ascensor.

En este caso, la energía útil será calculada directamente en función de la distancia de recorrido y la carga transportada, de forma que en este parámetro no se tienen en cuenta las pérdidas durante el movimiento, ya que se trata de la energía necesaria para realizarlo sin pérdidas.

De esta manera, dicha energía potencial ganada sería comparada directamente con el consumo generado en el motor y se obtendría este indicador.

Para determinar el consumo del motor, la norma UNE-EN ISO 25745-2:2015 indica la posibilidad de realizar un cálculo estandarizado en función de la categoría de uso del ascensor, su carga media y su altura de recorrido media, los cuales están también recogidos por la norma, aunque también acepta extraer el consumo mediante medición directa del motor, manera que se considera más exacta y simple. Este indicador está definido en la tabla 2.

Tabla 2. Indicador Energía Convertida

Indicador		Unidades
EnergíaConvertida (EC)		%
Descripción	Muestra el % de energía del motor convertida a energía útil para el movimiento.	
Fórmula	$EC = [EU / CM] * 100$	
Variable	Unidades	Descripción
EnergíaÚtil (EU)	kWh	Energía útil pura utilizada en el movimiento.
ConsumoMotor (CM)	kWh	Energía consumida en el motor por el movimiento.

5.2.3. Velocidad Efectiva

Este indicador facilitará un punto de vista distinto del rendimiento mecánico del ascensor, puesto que no tendrá en cuenta ninguna energía, sino velocidades. El ascensor tiene de serie una velocidad nominal a la que debería trabajar indistintamente de la carga que albergue, por lo que cualquier variación de esta velocidad en el movimiento del ascensor, significaría la presencia de algún fallo.

Entonces, se medirá la velocidad efectiva del ascensor en comparación con la velocidad nominal declarada por el fabricante, de forma que se puedan detectar anomalías mecánicas o deslizamiento no deseado de las poleas.

La fórmula está diseñada para que cualquier variación, positiva o negativa, afecte negativamente al valor del indicador. Este indicador está definido en la tabla 3.

Tabla 3. Indicador Índice Velocidad

Indicador		Unidades
ÍndiceVelocidad (IV)		%
Descripción	Muestra la relación entre la velocidad efectiva del ascensor con su velocidad nominal	
Fórmula	$IV = [1 - \sqrt{(VE - VN)^2} / VN] * 100$	
Variable	Unidades	Descripción
VelocidadEfectiva (VE)	m/s	Velocidad efectiva del ascensor durante el movimiento.
VelocidadNominal (VN)	m/s	Velocidad nominal declarada por el fabricante.

5.2.4. Calidad

Este indicador es muy semejante al del OEE, en el que se mide la calidad como la cantidad de piezas que se han producido sin defectos entre todas las piezas que se han producido. En este caso, podemos hacer cierta semejanza con el ascensor, puesto que es una máquina cuyo servicio es ofrecer viajes en el transporte vertical, por lo que se comparan los viajes en los que sí que ha habido alguna incidencia, por fallos o averías, con todos los viajes que se han realizado por el ascensor.

De esta forma, se puede observar si el ascensor tiene una tasa de averías muy alta, dando lugar a un servicio al cliente de peor calidad, y por tanto no satisfacer sus necesidades respecto a este aspecto.

Dado que los fallos en los viajes de un ascensor son eventos poco frecuentes en comparación con el elevado número de desplazamientos que realiza, este indicador no afectará notoriamente al cálculo total del OEEE, pero sí servirá de gran ayuda para detectar si existe un estado deficiente de los componentes del sistema y, por tanto, una mayor cantidad de fallos de las que debería. Este indicador está definido en la tabla 4.

Tabla 4. Indicador Calidad

Indicador		Unidades
Calidad (C)		%
Descripción	Muestra el % de los viajes totales realizados que no han sufrido ninguna incidencia.	
Fórmula	$C = [1 - (VCI / VT)] * 100$	
Variable	Unidades	Descripción
ViajesConIncidencia (VCI)	Viajes	Viajes del ascensor con incidencias (fallos o averías).
ViajesTotales (VT)	Viajes	Viajes totales realizados por el ascensor.

5.2.5. Eficiencia Energética Movimiento

Este indicador puede resultar muy similar al indicador Energía Convertida previamente definido, puesto que su cálculo difiere de un único componente, pero representan cosas muy distintas. El indicador Energía Convertida está diseñado para representar la eficiencia de conversión del sistema, es decir, de la energía que se requiere únicamente para el movimiento,

cuánta se consume en el motor, a causa de pérdidas en el movimiento como fricciones, entre otras. Mientras que el actual indicador, Eficiencia Energética Movimiento, representa cuánta energía consumida en el motor podría llegar a optimizarse, para reducir consumo energético y por tanto gastos.

Para ello, se compara la energía consumida en el motor durante el movimiento, el cual sería medido como se ha explicado previamente, con un consumo ideal que representa el mínimo que podría alcanzarse, según la energía útil necesaria para el movimiento, definida también previamente, y el rendimiento propio del motor eléctrico, que en ascensores ronda entre 80-92% (Revista del Ascensor, 2024).

$$C_{ideal} = \frac{E_{\text{útil}}}{\eta}$$

De esta forma, este indicador posibilita saber si el sistema necesita alguna modificación para optimizar al máximo el consumo durante el movimiento. Este indicador está definido en la tabla 5.

Tabla 5. Indicador Eficiencia Energética Movimiento

Indicador		Unidades
EficienciaEnergéticaMovimiento (EEM)		%
Descripción	Muestra la relación entre el consumo en el motor y el consumo mínimo alcanzable.	
Fórmula	$EEM = [CI / CM] * 100$	
Variable	Unidades	Descripción
ConsumoIdeal (CI)	kWh	Energía consumida mínima alcanzable.
ConsumoMotor (CM)	kWh	Energía consumida en el motor por el movimiento.

5.2.6. Eficiencia Energética Standby

Este indicador viene a representar lo mismo que el de movimiento, pero en este caso, para el consumo en *standby*. Primero, hay que definir este concepto; la condición de standby, según la norma UNE-EN ISO 25745-1:2024, se da cuando el ascensor está parado en un piso y puede haber reducido el consumo de energía a un nivel más bajo fijado para ese ascensor particular.

Entonces, durante esta condición, aunque el consumo es menor, el ascensor sigue consumiendo energía y si permanece durante mucho tiempo, puede llegar a producir consumos de gran importancia. De hecho, un estudio realizado por la Agencia Suiza para la Eficiencia Energética (SAFE), en 33 ascensores diferentes, se informó que el consumo de energía en modo de espera representa aproximadamente el 80 % del consumo total de energía (Elevator World, s.f.).

Por lo que una correcta optimización del consumo en esta condición, significará una reducción considerable del consumo total. Para ello, en este indicador, se define la energía consumida durante los períodos de standby, que según está recogido en la norma UNE-EN ISO 25745-2:2015 se podría extraer mediante medición directa, en comparación con la energía ideal a la que podría llegarse según las limitaciones del ascensor, y por tanto sería ofrecida por el fabricante. Este indicador está definido en la tabla 6.

Tabla 6. Indicador Eficiencia Energética Standby

Indicador		Unidades
EficienciaEnergéticaStandby (EES)		%
Descripción	Muestra la relación entre el consumo real y el consumo mínimo alcanzable, en standby.	
Fórmula	$EES = [CIS / CS] * 100$	
Variable	Unidades	Descripción
ConsumoIdealStandby (CIS)	kWh	Energía consumida mínima alcanzable en standby.
ConsumoStandby (CS)	kWh	Energía consumida en standby.

5.2.7. OEEE (Overall Equipment Effectiveness for Elevators)

El resultado final del indicador buscado, viene de la multiplicación de todos los anteriores indicadores diseñados. A modo de resumen:

$$\text{Disponibilidad (D)} = \left[1 - \frac{\text{Tiempo paradas}}{\text{Tiempo referencia} - \text{Tiempo mantenimientos}} \right] * 100$$

$$\text{EnergíaConvertida (EC)} = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Consumo motor}} * 100$$

$$\text{ÍndiceVelocidad (IV)} = \left[1 - \frac{\sqrt{(\text{Velocidad efectiva} - \text{Velocidad nominal})^2}}{\text{Velocidad nominal}} \right] * 100$$

$$\text{Calidad (C)} = \left[1 - \frac{\text{Viajes con incidencia} * 1000}{\text{Viajes totales}} \right] * 100$$

$$\text{EficienciaEnergéticaMovimiento (EEM)} = \frac{\text{Consumo ideal}}{\text{Consumo motor}} * 100$$

$$\text{EficienciaEnergéticaStandby (EES)} = \frac{\text{Consumo ideal standby}}{\text{Consumo standby}} * 100$$

La definición de este indicador está en la tabla 7.

Tabla 7. Indicador OEEE

Indicador		Unidades
OverallEquipmentEffectivenessforElevators (OEEE)		%
Descripción	Muestra el % del OEEE referido al desempeño del ascensor.	
Fórmula	$OEEE = D \times EC \times IV \times C \times EEM \times EES$	
Variable	Unidades	
Disponibilidad (D)	%	
EnergíaConvertida (EC)	%	
ÍndiceVelocidad (IV)	%	
Calidad (C)	%	
EficienciaEnergéticaMovimiento (EEM)	%	
EficienciaEnergéticaStandby (EES)	%	

6. Evaluación del OEEE

Una vez definida la metodología de cálculo del OEEE, en la que se detalla cada indicador que lo compone, es pertinente evaluar dicha metodología mediante la simulación de un caso real para su cálculo.

Para ello, se va a tener en cuenta el ascensor descrito durante la caracterización, cuyas especificaciones serán necesarias para extraer los datos necesarios de las variables involucradas en cada indicador. Algunos de los datos empleados en esta evaluación serán extraídos de datos proporcionados por la Oficina Federal de Energía de Suiza (SAFE), organismo utilizado como referencia en diversos estudios y normativas.

Según la norma UNE-EN ISO 25745-2:2015 y la simulación referenciada, tenemos las siguientes características:

- Sistema eléctrico de tracción por adherencia con cuarto de máquinas superior.
- Categoría de uso 5: 1500 viajes/día.
- Velocidad nominal: 2,5 m/s.

Aunque no se vaya a trabajar con un ascensor físico real, se van a utilizar datos aproximados y estimados, basados en una simulación realista y en la norma ISO 25745-2, fichas técnicas de fabricantes y estudios previos. El objetivo de esta práctica es mostrar la aplicabilidad del OEEE y analizar como los distintos parámetros pueden afectar al cálculo del mismo.

De esta forma, se va a ir calculando cada indicador, para explicar los datos empleados en cada uno, definiendo también los diferentes intervalos de resultados y cómo se consideran.

a) Disponibilidad

Según la norma ISO 25745-2, un ascensor de categoría de uso 5, en estas condiciones, funciona unos 360 días al año, por lo que habrían 5 días de parada programada, que no interferirían en el cálculo. En este caso, se va a tomar como referencia temporal para todos los indicadores un día completo, por lo que, para estimar el cálculo, se van a tomar los siguientes datos:

- TiempoReferencia (TP) = 24h = 1440 minutos.
- TiempoMantenimientos (TM) = 10 minutos.
- TiempoParadas (TP) = 20 minutos.

Se calcula:

$$D = [1 - (TP/(TR-TM))] = 98,6\%$$



Figura 10. Resultado indicador Disponibilidad

Según los fabricantes líderes en el sector, se estima que una correcta disponibilidad anual debe situarse por encima del 99%, siendo por debajo de 98% un servicio deficiente. En este caso, se ha calculado en referencia a un día, por lo que no se puede contrastar de la misma forma, pero el cómputo de todos los días del año debería dar en torno a esas cifras.

b) Energía Convertida

Según Barney y Lorente, (2013), tras diferentes cálculos teniendo en cuenta las características del ascensor y los parámetros que interfieren, se obtiene:

- ConsumoMotor (CM) = 37,447 kWh

Mientras que teniendo en cuenta una distancia media de recorrido y una carga media estandarizados por la norma ISO 25745-2, sabiendo que existen diferentes modos de funcionamiento, en los que no en todos se produce el mismo consumo en el motor, se estima:

- EnergíaÚtil (EU) = 28 kWh

Se calcula:

$$EC = [EU / CM] * 100 = 75\%$$

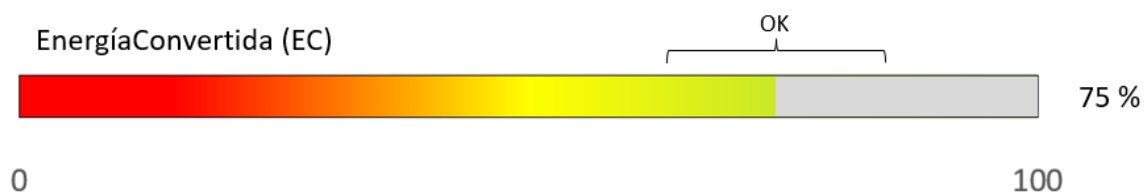


Figura 11. Resultado indicador Energía Convertida

De esta forma, se observa que, durante el movimiento, existen numerosos factores que producen pérdidas en el sistema, como fricciones en las guías, ya sean deslizaderas (más rozamiento) o rodaderas (menos rozamiento), pequeños deslizamientos de los cables y el propio rendimiento del motor. En ascensores, se estima una eficiencia de conversión adecuada en torno al 65-85% (Revista del Ascensor, 2024), dependiendo del tipo de sistema y el mantenimiento.

c) Índice Velocidad

En ascensores de estas características, la norma ISO 25745-2 establece que la velocidad nominal ronda los 2,5 m/s. Esta es una variable que no debería desviarse apenas de su valor nominal, por lo que una pequeña desviación es un claro indicador del mal estado de algún componente, por desgastes, deslizamientos o incluso fallos en los sensores. Incluso si esta desviación alcanza, según la norma UNE-EN 81-20, $\pm 15\%$ (depende del sistema) de la velocidad nominal, entrarían a actuar los sistemas de seguridad activa, como el limitador de velocidad o el paracaídas, en un caso más extremo.

Para este caso, al ser una anomalía poco usual se utilizarán los siguientes datos:

- VelocidadEfectiva (VE) = 2,5 m/s
- VelocidadNominal (VN) = 2,5 m/s

Se calcula:

$$IV = [1 - \sqrt{(VE - VN)^2} / VN] * 100 = 100\%$$



Figura 12. Resultado indicador Índice Velocidad.

d) Calidad

Al igual que en Disponibilidad, la referencia temporal para este indicador es determinante para la evaluación de su resultado, y puesto que en esta simulación se está utilizando un día, no es igual de representativo que en referencias de mayor tamaño en las que se realizaría el cómputo de todos los días.

Según fabricantes del sector, un ascensor bien mantenido tiene de media entre 2,4 y 18 averías al año, que, para una media de viajes realizados similar a este caso, aproximadamente 547.500 viajes, lo que es una relación casi nula, pero no cero, por lo que una desviación de este dato, podría suponer un evidente mal estado de los componentes del sistema.

Para esta simulación, se estima:

- ViajesConIncidencias (VCI) = 0 viajes
- ViajesTotales (VT) = 1500 viajes

Se calcula:

$$C = [1 - (VCI / VT)] * 100 = 100\%$$



Figura 13. Resultado indicador Calidad.

De forma que, teniendo en cuenta el rango aceptado, un número de viajes con fallos mayor a 18 respecto de 547.500 viajes, estaría indicando una calidad deficiente en el estado de los componentes y en el servicio ofrecido al cliente.

e) Eficiencia Energética Movimiento

Para este indicador, se necesita conocer el rendimiento del motor eléctrico implicado, que suele rondar entre 80 – 92% (Revista del Ascensor, 2024), para poder calcular el consumo ideal (CI) con el que comparar el consumo del motor (CM).

En este caso, se estima:

- $\eta = 90\%$

Por tanto, aplicándolo a la energía útil en el movimiento, previamente definida:

$$CI = \frac{EU}{\eta} = 28 \text{ kWh} / 0,9 = 31,11 \text{ kWh}$$

Se calcula:

$$EEM = [CI / CM] * 100 = 83,08 \%$$

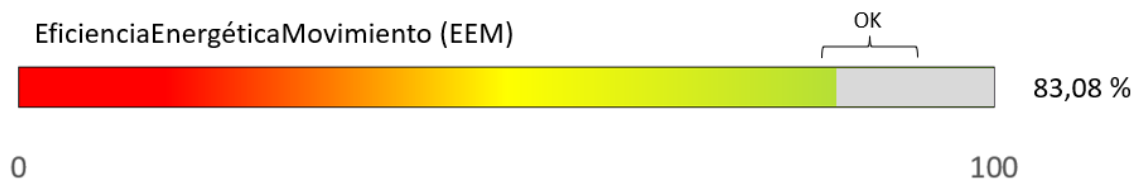


Figura 14. Resultado indicador Eficiencia Energética Movimiento.

Para una eficiencia energética durante el movimiento aceptable en un ascensor, se calcula que el EEM debería rondar entre 81 – 92 %.

f) Eficiencia Energética Standby

En este indicador, se necesita conocer, de mano del fabricante, el consumo en standby que consideramos ideal al que se podría llegar mediante una perfecta optimización. Para las características de esta simulación, se estima:

- ConsumoIdealStandby (CIS) = 3.5 kWh

Para estimar el consumo real en standby, se utiliza la simulación realizada por Barney y Lorente, (2013), de la cual se obtiene:

- ConsumoStanby (CS) = 4,229 kWh

Se calcula:

$$EES = [CIS / CS] * 100 = 82,74 \%$$



Figura 15. Resultado indicador Eficiencia Energética Standby

Para una eficiencia energética en standby aceptable en un ascensor, se estima que el EES debería rondar entre 70 – 85 %.

g) OEEE

Una vez calculados todos los indicadores, obtenemos el OEEE:

$$OEEE = D \times EC \times IV \times C \times EEM \times EES = 50,83 \%$$

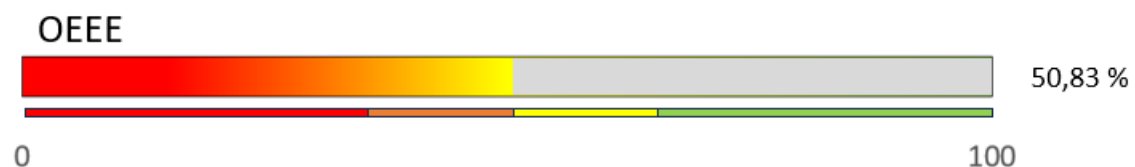


Figura 16. Resultado indicador OEEE

Teniendo en cuenta que está compuesto por un número considerable de indicadores, los cuales tienen diferentes intervalos de resultados aceptables, se calcula la evaluación del OEEE como:

- <35%: resultado deficiente.
- 35-50%: resultado medio-bajo.
- 50-65%: resultado medio-alto.
- >65%: resultado excelente.

Esta simulación, más allá de mostrar el procedimiento y la validez de la metodología de cálculo del OEEE, ha servido para definir y presentar los intervalos en los que cada indicador debería oscilar, además de dar la posibilidad de observar cómo afecta cada uno de ellos en el resultado total.

En esta sección, los datos no han sido rigurosamente seleccionados, ya que se trata de una simulación donde el resultado no es más que una mera demostración, aunque sí que han sido basados en estudios previos, normativas e incluso con referencias de fabricantes, de forma que los cálculos mantienen una coherencia, y resultan efectivos y prácticos para la evaluación del OEEE.

6.1. Sistemas de regeneración energética y su impacto en el consumo

Puesto que en el diseño del OEEE, el consumo energético de un ascensor, toma gran protagonismo a la hora de evaluar su desempeño, así como también influye significativamente en el consumo total de un edificio y por tanto mayor gasto económico y mayor impacto medioambiental, a continuación, se presenta una tecnología que en los últimos años ha ganado mucha popularidad, gracias al ahorro energético que conlleva su implantación en los ascensores: los sistemas de regeneración energética.

En primer lugar, los ascensores tienen dos procesos operativos distintos, que son descritos según sus cuatro modos de funcionamiento, definidos previamente: subida con carga y bajada sin carga, en la que el motor produce trabajo para el movimiento del ascensor, y subida sin carga y bajada con carga, en la que el motor actúa como freno activo, donde si el sistema no tiene un sistema de regeneración instalado, la corriente generada por inducción es dirigida a una resistencia y es transformada en calor, disipando la energía (KEB America, 2020).

Es en este punto, donde una correcta regeneración de esta energía disipada puede suponer una gran optimización energética del sistema. Existen diferentes formas de sistemas de regeneración, siendo las principales, el sistema de regeneración conectado a red y el sistema de regeneración con supercondensadores.

El primero, conectado a red, consiste en la devolución directa de la energía generada a la red eléctrica del edificio, mediante un inversor regenerativo, compuesto por transistores IGBT, que permite controlar con precisión el flujo bidireccional de la energía (Lin y Lian, 2017). Este método es habitual en edificios modernos, y permite reducir el consumo eléctrico total, siempre que haya demanda coincidente en la instalación. Según el estudio realizado por Lin y Lian, (2017), estos sistemas presentan una regeneración media 20-30%, refiriéndose a la energía que se ha devuelto a la red respecto del consumo total, pudiendo alcanzar en ocasiones puntuales incluso el 40%, sin afectar al uso del ascensor original. En la figura 17 se observa un diagrama que explica de forma simplificada el funcionamiento de este sistema:

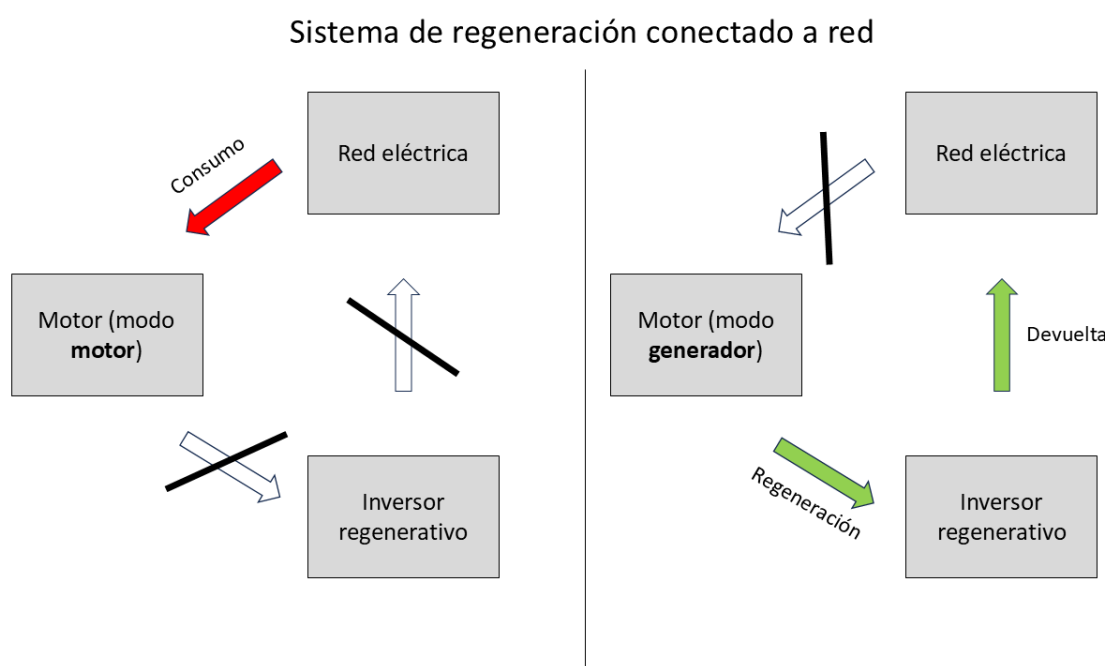


Figura 17. Sistema de regeneración conectado a red. Fuente: Elaboración propia

En cambio, la regeneración con supercondensadores permite almacenar localmente la energía generada durante las fases regenerativas del movimiento del ascensor. En lugar de inyectarla a la red, esta energía se transfiere a través de un convertidor bidireccional a un banco de supercondensadores, desde donde puede reutilizarse en trayectos posteriores o en el consumo en standby del sistema (Makar, Pravica y Kutija, 2022). A diferencia del conectado a red, es que, debido al uso de supercondensadores, se requiere mayor espacio de almacenamiento, lo que conlleva un coste inicial más elevado. Sin embargo, el estudio realizado por Zhang et al., (2018) afirma que se han podido alcanzar porcentajes de regeneración de hasta el 54% en condiciones de alta demanda, e incluso, sistemas comerciales basados en supercondensadores, como los desarrollados por (Epic Power, s.f.), han reportado reducciones de consumo energético de hasta el 70% en condiciones reales de operación. En la figura 18 se observa un diagrama que explica de forma simplificada el funcionamiento de este sistema:

Sistema de regeneración con supercondensadores

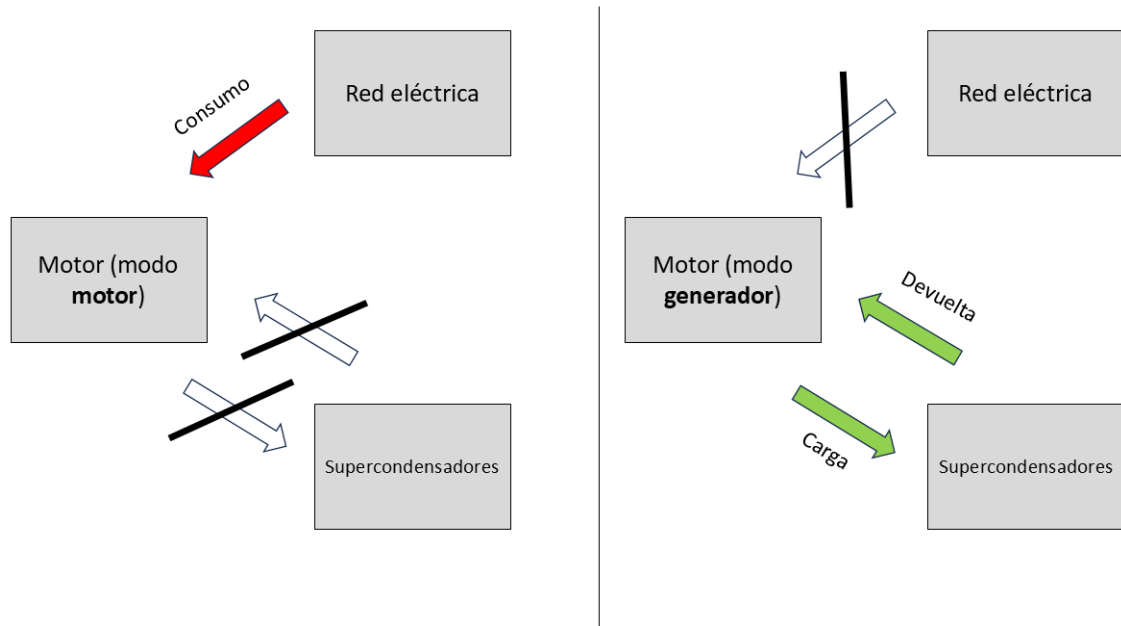


Figura 18. Sistema de regeneración con supercondensadores. Fuente: Elaboración propia

Para poner contexto, se va a aplicar la simulación de un sistema regenerativo de cada tipo, en el propio caso estudiado en esta sección. En él se obtienen los siguientes consumos: consumo del motor durante el movimiento en un día, $CM = 37,447 \text{ kWh}$, y el consumo durante el estado de standby en un día, $CS = 4,229 \text{ kWh}$. De forma que el consumo total resulta en $CT = 41,676 \text{ kWh}$.

El porcentaje de energía regenerada, Lin y Lian, (2017) la miden como:

$$\text{Energía Regenerada (ER)} = \frac{\text{Energía regenerada devuelta a la red}}{\text{Consumo total}} * 100$$

Para este caso, se tendrá en cuenta el porcentaje medio indicado previamente, $ER_{red} = 23\%$, para el sistema conectado a red, y $ER_{cond} = 40\%$, para el sistema con supercondensadores. Por lo que, en el primer caso, se estarían devolviendo a la red $9,585 \text{ kWh}$ en un día, de los $41,676 \text{ kWh}$ que representaban el consumo total, por lo que, durante un tiempo más prolongado, la diferencia de consumo sería muy considerable, suponiendo un gran ahorro en el consumo del edificio. Por ejemplo, si se considera esta media de regeneración a lo largo de un año entero, la energía total devuelta a la red sería $3,498 \text{ MWh}$ y a $0,20 \text{ €/kWh}$, supondría un ahorro de 700 € al año.

Por el otro lado, con los supercondensadores, se estaría llegando a almacenar $16,67 \text{ kWh}$ al día, que al año reduciría el consumo $6,08 \text{ MWh}$, e igualmente a $0,20 \text{ €/kWh}$, supondría un ahorro de 1216 € .

Pueden resultar resultados más bajos de lo esperado, pero representan un ahorro pasivo, el cual únicamente supone la inversión inicial de la instalación. Como observamos, mediante los

supercondensadores, se consigue alcanzar porcentajes mayores de regeneración, suponiendo así un mayor ahorro económico. Sin embargo, las instalaciones de estos sistemas conllevan un gasto más elevado en la instalación que los conectados a red, por lo que en cada caso sería preciso valorar cuál es el adecuado.

La implantación de estos sistemas es un debate común en edificios, y en estos momentos, son aquellos con altísima demanda de uso de ascensores, en los que existe un consumo muy elevado, los que sí que sacarían muy buena rentabilidad de estos sistemas, a medio plazo.

Respecto al impacto en el OEEE, tal como está diseñado, no afectaría a su cálculo, ya que se ha definido de forma que se comparen los consumos reales, con los consumos ideales a los que se podría llegar a alcanzar mediante una optimización perfecta del sistema, analizando así cuánto más podría optimizarse. De forma que, aplicando una regeneración activa, disminuiríamos el consumo del ascensor, pero también disminuiría el consumo ideal en el que nos basamos como referencia.

7. Conclusión

A lo largo del presente trabajo se ha propuesto el diseño e implementación de un nuevo KPI, el OEEE (Overall Equipment Effectiveness for Elevators), como una adaptación innovadora del ya existente OEE, orientada específicamente al caso de los ascensores desde una perspectiva operativa y energética. Este KPI permite evaluar el rendimiento de estos sistemas, incorporando los parámetros originales del OEE (disponibilidad, rendimiento y calidad), ajustados y diseñados según las necesidades de este caso, y además se ha implementado uno nuevo, basado en la eficiencia energética.

Los objetivos definidos al inicio se han alcanzado de forma satisfactoria: se ha analizado en profundidad el OEE y su base teórica, se ha caracterizado el funcionamiento de un ascensor como caso de estudio, se han identificado las variables clave necesarias y se ha logrado desarrollar por completo el OEEE. Esta última parte ha supuesto el mayor esfuerzo del trabajo, dada la complejidad metodológica de definir indicadores precisos, relevantes y medibles, así como de establecer fórmulas adecuadas basadas en parámetros realistas.

Este estudio representa una nueva visión en el sector de los ascensores, alineándose con un método propio de la Industria 4.0, los KPIs, que resultan de gran utilidad para el análisis de cualquier sistema ciberfísico (CPS). Además, supone la apertura de un nuevo campo en el sector, ya que no existe evidencia científica de otros estudios que busquen el análisis completo en cuanto a rendimiento y eficiencia energética, permitiendo este enfoque global, pero descompuesto en indicadores más específicos para identificar con precisión en qué parámetros se encuentran las ineficiencias.

El OEEE no solo es útil para analizar el rendimiento, sino que se ha diseñado para posibilitar una optimización del consumo energético del sistema, teniendo en cuenta la sostenibilidad, para disminuir el consumo, reducir el gasto económico y el impacto medioambiental y, por tanto, el impacto en la sociedad, asociándose con el concepto de la triple-bottom line, definida en el estudio.

Respecto a su relación con la Industria 4.0, el presente trabajo presenta posibles líneas de desarrollo futuro, en el que se logre introducirlo en dicho entorno al completo. Los KPIs son solo un pequeño componente de esta forma de trabajo, en la que, en visión de futuro, se pueda enlazar con otras metodologías. En CPSs como los ascensores modernos, se podría trabajar a tiempo real, con herramientas de análisis de datos como la IA, permitiendo trabajar de forma autónoma, modificando los parámetros necesarios en función de los resultados del OEEE.

Otra línea de desarrollo posible tras este trabajo, sería la propia evaluación del OEEE en un entorno real, de forma que se pueda comprobar su verdadera utilidad e incluso poder llegar a ajustarlo. Además, su diseño, puede inspirar o servir como base para nuevos KPIs, ya sean

relacionados con el transporte, o cualquier otro campo en el que se quiera buscar un análisis y optimización del rendimiento y eficiencia energética.

En el desarrollo del actual Trabajo de Fin de Grado, uno de los principales retos fue la definición de los indicadores que componen el OEEE, debido a la complejidad de diseñar sus fórmulas, así como elegir las variables correctas. Además, a la hora de evaluar el KPI, la falta de datos reales obligó a la necesidad de buscar alternativas, mediante la búsqueda de estudios previos, simulaciones o incluso datos ofrecidos por los mismos fabricantes.

Este trabajo me ha permitido adquirir conocimientos avanzados sobre el uso de los KPIs, el funcionamiento de los ascensores y la aplicación de normativas internacionales para alinearse con especificaciones técnicas determinadas. A nivel personal, ha sido una experiencia enriquecedora que me ha enseñado a organizarme más allá del corto plazo y a enfrentarme a problemas con la necesidad de resolverlos para poder seguir adelante. Además, me ha acercado a conceptos relacionados con la Industria 4.0 y el uso de tecnologías con gran aplicabilidad, que me resultan de gran interés, no solo en la actualidad, sino respecto al futuro de mi recorrido con la ingeniería, como introducción a un ámbito que me gustaría desarrollarme profesionalmente.

Bibliografía

Asociación Española de Normalización (2024) UNE-EN ISO 25745-1:2024. *Eficiencia energética de los ascensores, escaleras mecánicas y andenes móviles. Parte 1: Medición de la energía y verificación* (ISO 25745-1:2023). Madrid: UNE.

Asociación Española de Normalización (2015) UNE-EN ISO 25745-2:2015. *Eficiencia energética de los ascensores, escaleras mecánicas y andenes móviles. Parte 2: Cálculo energético y clasificación de los ascensores* (ISO 25745-2:2015, versión corregida 2015-12-15). Madrid: AENOR.

Barney, G. y Lorente, A. (2013) *Simplified Energy Calculations for Lifts Based on ISO/DIS 25745-2*. 3rd Symposium on Lift and Escalator Technologies.

CEN – European Committee for Standardization (2014) EN 81-20:2014. *Safety rules for the construction and installation of lifts – Lifts for the transport of persons and goods – Part 20: Passenger and goods passenger lifts*. Brussels: CEN.

Chaurey, S., Kalpande, S.D., Gupta, R.C. y Toke, L.K. (2021). A review on the identification of total productive maintenance critical success factors for effective implementation in the manufacturing sector. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(1), pp. 114 DOI: 10.1108/jqme-11-2020-0118.

Elevator World (s.f.) Energy efficiency of elevators.
<https://elevatorworld.com/es/article/energy-efficiency-of-elevators/> (Accedido: 22 febrero 2025).

Epic Power (s.f.) Gestión de la energía.
<https://epicpower.es/productos/gestion-de-la-energia/> (Accedido: 9 junio 2025).

Esteban, E., Salgado, O., Iturrospe, A. y Isasa, I. (2023). Virtual sensing-based monitoring and maintenance in elevators. *Structural Health Monitoring*, 23(1), pp. 230 DOI: 10.1177/14759217231160413.

Féres, W.M.L. y Estanislau Neto, B.S. (2023). Overall Drilling Effectiveness: key performance indicator adapted for rock drilling. *Research, Society and Development*, 12(3) DOI: 10.33448/rsd-v12i3.40462.

Jan, Z., Ahamed, F., Mayer, W., Patel, N., Grossmann, G., Stumptner, M. y Kuusk, A. (2023). Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 216, Doi: 10.1016/j.eswa.2022.119456.

KEB America (2020) Elevator regenerative drives: How they work. <https://www.kebamerica.com/blog/elevator-regenerative-drives-how-they-work/> (Accedido: 20 mayo 2025).

Les, A., Morella, P., Lambán, M.P., Royo, J. y Sánchez, J.C. (2024). A New Indicator for Measuring Efficiency in Urban Freight Transportation: Defining and Implementing the OEM (Overall Equipment Effectiveness for Mobility). *Applied Sciences*, 14(2) Doi: 10.3390/app14020779.

Lin, K., Lian, K. (2017). Actual measurement on regenerative elevator drive and energy saving benefits. *International Automatic Control Conference (CACS)*, Pingtung, Taiwan, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/CACS.2017.8284249.

Luo, S.D., Starnoni, F. y Schiraldi, M.M. (2023) *On the relationship between human factor and overall equipment effectiveness (OEE): An analysis through the adoption of analytic hierarchy process and ISO 22400*. SAGE Publications.

Madreiter, T. y Ansari, F. (2024). From OEE to OSEE: How to reinforce Production and Maintenance Management Indicator Systems for Sustainability?. *IFAC-PapersOnLine*, 58(8), pp. 204 DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.121.

Makar, M., Pravica, L. y Kutija, M. (2022). Supercapacitor-Based Energy Storage in Elevators to Improve Energy Efficiency of Buildings. *Applied Sciences*, 12(14) Doi: 10.3390/app12147184.

Marinagi, C., Reklitis, P., Trivellas, P. y Sakas, D. (2023). The Impact of Industry 4.0 Technologies on Key Performance Indicators for a Resilient Supply Chain 4.0. *Sustainability*, 15(6) Doi: 10.3390/su15065185.

Ng Corrales, L.D.C., Lambán, M.P., Morella, P., Royo, J., Sánchez Catalán, J.C. y Hernandez Korner, M.E. (2022). Developing and Implementing a Lean Performance Indicator: Overall Process Effectiveness to Measure the Effectiveness in an Operation Process. *Machines*, 10(2) DOI: 10.3390/machines10020133.

Peng, Q., Li, Z., Yuan, H., Huang, G., Li, S. y Sun, X. (2018). A Model-Based Unloaded Test Method for Analysis of Braking Capacity of Elevator Brake. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1) Doi: 10.1155/2018/8047490.

Rakes, D., Arif, M., Setiawan, A., Nasution, K.P. y Prastyo, Y. (2024). Preventive Maintenance on CNC Machines Using the OEE Method to Reduce Downtime at PT. MTAT. *Jurnal Impresi Indonesia*, 3(7), pp. 481 Doi: 10.58344/jii.v3i7.5116.

Revista del Ascensor (2024) Ascensores eléctricos: motores y eficiencia. <https://revdelascensor.com/2024/02/14/ascensores-electricos-motores-y-eficiencia/> (Accedido: 10 mayo 2025).

Ryalat, M., Elmoaqet, H. y Alfaouri, M. (2023). Design of a Smart Factory Based on Cyber-Physical Systems and Internet of Things towards Industry 4.0. *Applied Sciences*, 13(4) DOI: 10.3390/app13042156.

Ullah, M.R., Molla, S., Siddique, I.M., Siddique, A.A. y Abedin, M.M. (2023). Optimizing Performance: A Deep Dive into Overall Equipment Effectiveness (OEE) for Operational Excellence. *Journal of Industrial Mechanics*, 8(3), pp. 26 Doi: 10.46610/joim.2023.v08i03.004.

Zhang, Y., Yan, Z., Yuan, F., Yao, J. y Ding, B. (2018). A Novel Reconstruction Approach to Elevator Energy Conservation Based on a DC Micro-Grid in High-Rise Buildings. *Energies*, 12(1) Doi: 10.3390/en12010033.

Índice de figuras

Figura 1. Uso de los datos en tiempo real en la Industria 4.0.....	8
Figura 2. Componentes del OEE.....	13
Figura 3. Ventajas OEE.....	15
Figura 4. Tabla A-1. Clasificación por el número de viajes por día. .	17
Figura 5. Diagrama de un sistema de tracción.	18
Figura 6. Componentes del ascensor.....	20
Figura 7. Modos de funcionamiento del ascensor.....	21
Figura 8. Diagrama de Venn para OEEE.	22
Figura 9. Componentes del OEEE.	23
Figura 10. Resultado indicador Disponibilidad.....	30
Figura 11. Resultado indicador Energía Convertida	30
Figura 12. Resultado indicador Índice Velocidad.....	31
Figura 13. Resultado indicador Calidad.....	32
Figura 14. Resultado indicador Eficiencia Energética Movimiento.	32
Figura 15. Resultado indicador Eficiencia Energética Standby	33
Figura 16. Resultado indicador OEEE	33
Figura 17. Sistema de regeneración conectado a red.	35
Figura 18. Sistema de regeneración con supercondensadores.....	36

Índice de tablas

Tabla 1. Indicador Disponibilidad.....	24
Tabla 2. Indicador Energía Convertida	25
Tabla 3. Indicador Índice Velocidad	26
Tabla 4. Indicador Calidad	26
Tabla 5. Indicador Eficiencia Energética Movimiento	27
Tabla 6. Indicador Eficiencia Energética Standby	28
Tabla 7. Indicador OEEE	28

