



PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATOLICA  
DE VALPARAISO



**Nadia Daniela Carrasco Lucero**

# Almacenamiento y recuperación de energía en sistemas eléctricos

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica**



PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
**CATOLICA**  
**DE VALPARAISO**

# Almacenamiento y recuperación de energía en sistemas eléctricos

Nadia Daniela Carrasco Lucero

Informe Final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,

aprobada por la comisión de la

Escuela de Ingeniería Eléctrica de la

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

conformada por

Sr. Patricio Robles Calderón

Profesor Guía

Sr. Jorge Medina Hanke

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 18 de Julio de 2017

*A las personas más importantes de mi vida, mi hijo Nicolás, mi pareja Francisco y mis padres,  
Christian e Ivonne.*

*Los amo*

# Agradecimientos

En primer lugar agradezco a los profesores Patricio Robles Calderón y Jorge Medina Hanke, por su disposición, tiempo y consejos para guiarme en este trabajo.

Luego, agradezco a mis padres que depositaron su confianza en mí y me acompañaron, apoyaron en todo este camino con su amor y entusiasmo tan necesario en esta etapa. Agradecimiento que por supuesto extiendo a mi pareja Francisco Hernández que siempre estuvo a mi lado apoyándome, aconsejándome y dándome animo en momentos de aflicción; que haya terminado este ciclo en gran parte es gracias a ti amor, te amo.

Y por último agradezco a mis compañeros de universidad, José Robles y Norman Diaz, que vivimos la mayor parte de esta etapa juntos, pasamos buenos y malos momento pero siempre nos apoyamos y estuvimos juntos, lo mejor fue conocerlos. Muchas gracias por hacerme parte de sus vidas ¡En verdad!

*Valparaíso, 28 de Febrero de 2017*

N.C

# Resumen

Este trabajo está dividido en dos grandes temas; primeramente están los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica y por otro lado, los sistemas de recuperación de energía como son los frenos regenerativos en cintas transportadoras de mineral.

En el último tiempo en Chile se ha manifestado un importante crecimiento de proyectos de centrales eólicas, contando a fines del 2012 con más de 3 GW en proyectos aprobados según el Servicio de Evaluación Ambiental. Sin embargo, debido a la naturaleza variable del recurso eólico estas centrales no pueden asegurar la continuidad del suministro energético, lo cual ha dificultado el concretar contratos en el mercado. Dentro de las medidas que permiten solucionar dicho problema se encuentra la implementación de sistemas de almacenamiento de energía (SAE) en conjunto con los parques eólicos de forma tal de asegurar la inyección de energía durante un cierto periodo de tiempo. El problema de dicha solución son los altos costos de estas tecnologías los cuales no permiten su aplicación a gran escala, haciendo del dimensionamiento de estos equipos un problema difícil. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es optimizar el tamaño del sistema de almacenamiento asociado a un parque eólico en términos de energía y potencia. La optimización se realiza de forma de maximizar las utilidades del conjunto parque eólico más almacenamiento. La estrategia utilizada consiste en almacenar energía durante periodos de precios bajos en el mercado spot e inyectar dicha energía durante periodos de precios altos. El análisis se realiza para el caso específico del Parque eólico Canela.

Por otro lado se estudia la factibilidad de aprovechar la energía liberada en cintas transportadoras de mineral, la cuales son capaces de comportarse como generadores durante el proceso de frenado, transformando parte de la energía cinética y potencial que poseen en energía eléctrica. Una vez que se genera, esta energía puede emplearse para alimentar los servicios auxiliares de la propia cinta, así como inyectarla a la red eléctrica de la planta. Desde el punto de vista económico, es de gran utilidad determinar el ahorro energético que supondría la inclusión de ésta tecnología, para poder establecer una comparación e identificar en cada caso concreto si resulta conveniente realizar las inversiones necesarias.

Palabras claves: almacenamiento de energía, aprovechamiento de energía y freno regenerativo.

# Abstract

This work is divided in two main topics: first, are the electric energy storage systems and second, the energy recuperation systems such as regenerative brakes in mineral conveyor belts.

In recent times, Chile has shown an important growth in the wind power plants project, with more than 3 GW in approved projects by the Environmental Assessment Service at the end of 2012. However, due to the variable nature of the wind power resource, these plants can not ensure energy for a determined period time, which has complicated closing contracts in the market. Within the measures that allow solving these problem is the implementation of energy storage systems (SAE), in cooperation with wind parks, so they can ensure the injection of energy during a period of time. The problems of such solution are the high costs of these technologies, which do not allow its application to massive scale. In this context, the aim of the present work is optimize the size of the storage system associated to a wind park in terms of energy and power. The optimization is made in order to maximize the utilities of the set: wind Park plus storage. The strategy applied consists in store energy during the low prices period in the spot market and inject that energy during the periods of high prices. The analysis is made for the Canela edic park.

On the other hand, there is the energy utilization in minerals conveyor belts, which are capable of behave as generators during the braking process, transforming part of the kinetic and potential energy in electric energy. Once generated, this energy can be used to feed the auxiliary services of the belt, and therefore, inject it to the electricity network of the plant. Now, from the economical point of view, it would be useful to determine the energy saving that would mean the inclusion of this technology, so a comparison can be established and indicate in every specific case if it is convenient to invest.

Keywords: Energy storage, regenerative breaking and energy efficiency.

# Índice general

Introducción.....	3
Objetivos generales .....	5
1 Panorama general sobre energía eólica en Chile .....	6
1.1 Energía eólica .....	6
1.1.1 Potencial del viento.....	7
1.1.2 Turbinas y aerogeneradores.....	8
1.1.3 Aplicaciones de la energía eólica.....	9
1.1.4 Parques eólicos.....	10
1.1.5 Situación Actual de la energía eólica .....	11
1.2 Beneficios de la energía eólica.....	12
1.3 Restricciones de la energía eólica.....	12
1.4 Proyecciones futuras.....	13
1.5 Contexto internacional .....	13
2 Sistemas de almacenamiento de energía.....	14
2.1 Pilas de combustibles hidrógeno .....	14
2.1.1 Almacenamiento de energía eólica en pilas de combustible hidrógeno .....	16
2.1.2 Beneficios y restricciones del almacenamiento por pila de hidrógeno.....	16
2.2 Sistemas de Bombeo .....	17
2.2.1 almacenamieto de energía eólica por bombeo de agua .....	17
2.2.2 Beneficios y restricciones del almacenamiento de energía por bombeo .....	18
2.3 Almacenamiento de energía por aire comprimido .....	18
2.4 Sistemas BESS.....	20
2.4.1 Acumulador de litio .....	21
2.4.2 Acumulador de plomo ácido .....	23
2.4.3 Acumulador de flujo .....	25
2.4.4 Acumulador de sulfuro de sodio .....	27
2.4.5 Acumulador de níquel cadmio .....	28
2.5 Parámetros técnicos y económicos.....	30
3 Freno regenerativo.....	32

3.1 Principio de funcionamiento de la maquina de inducción .....	32
3.2 Principio de funcionamiento del motor asincrónico alimentado por convertidores de frecuencia. ....	35
3.3 Tipos de frenado .....	36
3.3.1 Frenado reostático .....	36
3.3.2 Frenado regenerativo .....	36
3.4 Principio de funcionamiento del sistema de frenado regenerativo .....	37
3.5 El frenado regenerativo como ahorro de energía .....	38
3.5.1 Método A: Variadores regenerativos .....	38
3.5.2 Método B: Sistema regenerativo MultiDrive .....	38
3.5.3 Método C: Choppers de frenado y resistencias .....	38
3.6 Variadores de velocidad .....	39
3.7 Alternativas de uso de la energía regenerada .....	40
3.7.1 Para servicios auxiliares .....	40
3.7.2 Para uso en otros elementos del sistema. ....	40
3.7.3 Retorno a la Red de alimentación de la planta. ....	41
3.7.4 Almacenamiento .....	41
3.7.5 Almacenamiento y retorno a la Red. ....	41
3.8 Situación actual en Chile .....	41
4 Aplicaciones .....	42
4.1 Aplicación de los sistemas de almacenamiento .....	42
4.1.1 Análisis de almacenamiento de energía en pila de combustible.....	43
4.1.2 Análisis de almacenamiento energía por bombeo de agua .....	43
4.1.3 Análisis de almacenamiento de energía por aire comprimido .....	45
4.1.4 Análisis de almacenamiento de energía en BESS .....	45
4.2 Freno regenerativo en cintas transportadoras.....	49
4.2.1 Cintas transportadoras.....	50
4.2.2 Transportadoras de descenso .....	50
4.2.3 Cálculo de la energía regenerada .....	51
5 Discusiones y conclusiones .....	53
Bibliografía .....	56
Apéndices	
A Sistemas de almacenamiento de energía.....	58
B Componentes de un BESS.....	66

# Introducción

La energía ha sido desde la antigüedad un factor impulsor del desarrollo de la sociedad, pero no siempre su uso ha respetado la preservación de la naturaleza y el medio ambiente. En ese sentido, las fuentes tradicionales de generación de energía, como los hidrocarburos y la energía nuclear, son altamente contaminantes, por lo que se plantea una contradicción al desearse un desarrollo sostenible que no comprometa el bienestar de las futuras generaciones. Es por ello que la generación de energía limpia está adquiriendo una importancia cada vez mayor en nuestra sociedad. Si a esto se añade que las reservas de hidrocarburos y combustibles fósiles son limitadas, parece lógico que las fuentes de energías alternativas, como la solar y la eólica, se vislumbren como la solución energética a la sociedad del mañana, siendo, por demás, fuentes de energía inagotables. En la actualidad, la problemática energética es uno de los grandes desafíos del país.

Las energías renovables no convencionales (ERNC) juegan un papel fundamental en esta problemática. Dentro de las ERNC la que presenta un gran auge es la energía solar, como los paneles fotovoltaicos y las celdas a combustible. Sin embargo en ambos, debido a la obtención de tensiones continuas de bajo valor, se requiere de la interconexión de diversos módulos para elevar dichas tensiones. Los sistemas de conversión y procesamiento de energía toman un papel vital dentro de las aplicaciones basadas en ERNC.

Bajo este contexto la generación eólica debido a su mayor desarrollo tecnológico-comercial ha liderado la penetración de ERNC en la matriz energética mundial. En Chile la situación no ha sido diferente. A fines del 2012 se contaba con 205 MW en capacidad instalada en operación, 97 MW en construcción, 3.250 MW en proyectos aprobados y 2.640 MW en proyectos en calificación.

Sin embargo, existen importantes problemas que impiden la inclusión masiva de centrales eólicas a los sistemas eléctricos. Uno de los principales problemas es su alta variabilidad en generación.

Para compensar esta variabilidad, es posible instalar sistemas de almacenamiento de energía de diversas tecnologías, tales como baterías, bombeo de agua, aire comprimido, pilas de

combustible, etc. Sin embargo, dados los altos costos asociados a las tecnologías de almacenamiento, el dimensionamiento óptimo de dichos equipos resulta de suma importancia.

Los sistemas de almacenamiento de energía (ESS) pueden ser utilizados para realizar mejoras sustanciales en los sistemas eléctricos de potencia. Esto se debe a la flexibilidad que entregan durante la carga y la descarga, permitiendo diversas aplicaciones, entre las que destacan el recorte de potencia punta; compra y venta de energía, disminución de pérdidas en líneas de transmisión y evitar congestión en líneas de transmisión. En particular para una distribuidora resulta de especial interés estas características del ESS, ya que le permiten aumentar su rentabilidad.

En el contexto anterior, el presente trabajo de memoria consiste en optimizar el tamaño de los sistemas de almacenamiento asociado a un determinado parque eólico en términos de energía y potencia, sujeto a restricciones técnico-económicas.

Dada la gran demanda de mineral a nivel mundial, es que existe la necesidad de optimizar los procesos de producción. CODELCO, es la empresa más grandes de Chile y sus operaciones de explotación, procesamientos de minerales y envío a los mercados son realizados por sus divisiones. Estas son Codelco Norte (fusión de las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic), la División El Salvador, la División Andina y la División El Teniente.

La Fundación El Teniente de CODELCO-CHILE posee entre sus instalaciones los siguientes equipos:

Sistema de correas transportadoras utilizado para trasladar y dosificar el concentrado de cobre, cuarzo y la carga fría de escorias en los procesos de fundición y conversión  
Planta de chancado de escoria  
Molino de Preparación

Para el correcto funcionamiento del Sistema de correas transportadoras es indispensable asegurar en CODELCO-CHILE División El Teniente la continuidad operacional y con ello la disponibilidad y confiabilidad requerida por los programas de producción comprometidos.

Por tal razón es que estudia la implementación de cintas transportadoras de mineral, comprometiéndose con la visión de la corporación de mantener los niveles de producción dentro de las metas propuestas.

Dentro de este marco el freno regenerativo toma un papel fundamental. El aprovechamiento de los frenados y la energía potencial de las cargas permite la regeneración de energía en los sistemas eléctricos, en los cuales se pueden aplicar nuevas técnicas y tecnologías. Una excelente aplicación es la utilización de freno regenerativo en las cintas transportadoras de mineral, el fin es recuperar la energía desperdiciada en este proceso, para su posterior utilización ya sea almacenándola o inyectándola a la red.

### Objetivos generales

- Dimensionar de manera óptima los parámetros de alternativas de almacenamiento energético (energía y potencia) asociado a un parque eólico, sujeto a restricciones técnico-económicas. Con el propósito de aumentar la utilidad del parque eólico almacenando energía durante periodos de precios bajos del mercado spot e inyectando esta energía almacenada durante periodos de precios altos.
- Desarrollar metodología para analizar y evaluar alternativas de recuperación de energía en procesos industriales específicamente frenos regenerativos aplicados en cintas transportadoras de minerales.

Con la finalidad de cumplir los objetivos generales, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Revisión bibliográfica sobre: publicaciones acerca de optimizaciones de sistemas de recuperación de energía y almacenamiento energético para parques eólicos y estado del arte de las distintas tecnologías.
- Definición de método de optimización a utilizar.
- Definición de esquema de operación de los sistemas de almacenamiento que priorice la inyección de energía almacenada durante periodos de precios altos y de los sistemas de recuperación de energía que priorice el aprovechamiento máximo de los recursos energéticos disminuyendo los costos.
- Análisis de sensibilidad de resultados de optimización con respecto a variables de entrada, parámetros técnicos y económicos del almacenamiento y recuperación de energía.

# 1 Panorama general sobre energía eólica en Chile

Chile vive una verdadera revolución en materia de energías renovables. De acuerdo a la última versión del New Energy Finance Climascoppe elaborado por Bloomberg New Energy Finance y el Banco Interamericano de Desarrollo, nuestro país tiene el tercer lugar en el ranking global que mide el atractivo de inversión en energías renovables.

Por su parte, la participación de las energías renovables no convencionales en la generación eléctrica del país, a nivel de los sistemas principales SIC y SING, alcanzó un 6,4% durante el año 2009. Esta participación ha disminuido en los últimos años producto del crecimiento de sectores que tienen un consumo intensivo de derivados del petróleo, como el transporte, y del aumento de la capacidad de generación eléctrica térmica a partir de gas natural. Sin perjuicio de ello, la participación de las energías renovables sigue siendo significativa en el abastecimiento energético nacional, tal como se desprende del balance de consumo bruto de energía primaria.

## 1.1 Energía eólica

La energía eólica se origina del movimiento de las masas de aire, es decir, el viento. Corresponde a una fuente de energía renovable que se encuentra disponible con un potencial significativo a nivel mundial. Al igual que la mayoría de las fuentes de energías renovables, proviene del sol, ya que son diferencias de temperatura entre distintas zonas geográficas de la tierra las que producen la circulación del aire.

Las zonas más favorables para la ubicación de proyectos eólicos son las áreas costeras, llanuras interiores abiertas, valles transversales y zonas montañosas donde existe mayor potencial de viento.

La energía producida por el viento se considera una fuente de energía renovable indirecta de la energía solar, pues el Sol por medio de la radiación que emite, modifica la temperatura de las partículas que conforman la atmósfera, produciendo corrientes de viento. Este se origina por cambios de presión en las masas de aire, generadas por factores como la inclinación de los rayos del Sol que llegan a la atmósfera variando su temperatura, las características geográficas del sector y el contenido de agua en el aire.

La cantidad de energía (mecánica o eléctrica) que pueda generar una turbina eólica depende mucho de las características del viento vigentes en el sitio de instalación. De hecho, la producción puede variar en un factor de dos a tres entre un sitio regular y uno excelente, de manera que la rentabilidad de un proyecto depende directamente del recurso eólico local. Por esta razón, es necesario un estudio técnico detallado de las características del viento en un sitio específico antes de avanzar en un proyecto de cualquier magnitud.

### 1.1.1 Potencial del viento

La potencia de una masa de aire que fluye a una velocidad  $v$  a través de un área, puede ser calculada como:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1-1)$$

Donde:

- $P_v$ : Potencia cinética del viento, en [W].
- $A$ : Área frontal del volumen de aire a modelar su potencia, en [ $m^2$ ].
- $\rho$ : Densidad del aire, en [ $kg/m^3$ ].
- $v$ : Velocidad del viento, en [ $m/s^1$ ].

De la ecuación 1-1 se tiene que la potencia del viento es proporcional al área frontal del volumen de aire, a la densidad del aire y al cubo de la velocidad del viento. Lo último significa que un cambio del 10% en la velocidad del viento, implica un cambio del 33% en la potencia.

Por su parte la densidad del aire es función de la presión y la temperatura del aire, las cuales se pueden expresar en función de la altura sobre el nivel del mar:

$$\rho(z) = \frac{\rho_o}{RT} \cdot \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right) \quad (1-2)$$

Donde:

- $\rho(z)$ : Densidad del aire en función de la altura sobre el nivel del mar, en [ $kg/m^3$ ].
- $\rho_o$ : Densidad del aire a nivel del mar estándar,  $1,225[kg/m^3]$ .
- $R$ : Constante de los gases,  $287,05 [J/(kg K)]$ .
- $T$ : Temperatura del aire, en [ $K$ ].
- $g$ : Constante de gravedad  $9,81[m/s^2]$ .
- $z$ : Altura sobre el nivel del mar, en [ $m$ ].

Es así como la potencia del viento puede calcularse en función de la velocidad y la altura sobre el nivel del mar.

Para estimar la velocidad a mayor altura se utiliza la Ley Exponencial de Hellmann (ecuación 1-3). Esta fórmula se emplea usualmente, pues por lo general se obtienen mediciones a 10 metros de altura, mientras que las turbinas se instalan a alturas de 100 m considerando como referencia el terreno.

$$v_h = v_o \left( \frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (1-3)$$

Donde:

- $v_h$ : Velocidad del viento a una altura por estimar, en [m/s].
- $v_o$ : Velocidad del viento a una altura ya estudiada, en [m/s].
- $h$ : Altura de velocidad a estimar, en [m].
- $h_o$ : Altura estudiada, en [m].
- $\alpha$ : Coeficiente de Hellmann, ver Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno

Tipo de terreno	$\alpha$
Lugares llanos con hielo o hierba	0,08 – 0,12
Lugares llanos (mar, costa)	0,14
Terrenos poco accidentados	0,13 – 0,16
Zonas rústicas	0,20
Terrenos accidentados o bosques	0,20 – 0,26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0,25 – 0,40

La potencia del viento no puede ser completamente transformada, si esto ocurriese el viento se detendría y generaría congestión impidiendo al resto de aire fluir a través del área de extracción. El máximo teórico fue descubierto por Betz, en 1926. De acuerdo a Betz sólo el 59% de la potencia del viento puede ser extraída.

### 1.1.2 Turbinas y aerogeneradores

Dispositivo que se utiliza para aprovechar la energía contenida en el viento y transformarla en eléctrica. Una turbina obtiene su potencia de entrada convirtiendo la energía cinética del viento en un par (fuerza de giro), el cual actúa sobre las palas. Para la producción de electricidad la energía rotacional es convertida en eléctrica por el aerogenerador.

Las turbinas que se encuentran en el mercado son muy confiables, con factores de disponibilidad de más de un 98%, lo cual significa que pueden operar durante más del 98% del año; generalmente, apagándose sólo durante el período de mantenimiento. Además las turbinas sólo requieren mantenimiento cada seis meses.

Aparte de las características del viento, la cantidad de energía que pueda ser transferida depende de la eficiencia del sistema y del diámetro del rotor. Las mejores aerogeneradores que se

construyen actualmente tienen un índice global de eficiencia (tomando en cuenta la del rotor y el generador) de casi 35%.

### 1.1.3 Aplicaciones de la energía eólica

- **Bombeo de Agua:** La aplicación mecánica más frecuente de la energía eólica es el bombeo de agua, para lo cual son especialmente adecuadas las turbinas de baja potencia. Esta aplicación demanda un alto par de arranque y de una baja velocidad específica de viento, por lo que se conoce como un “sistema eólico lento”. Se aprovecha el viento para el bombeo de agua en áreas aisladas de la red eléctrica. Los sistemas mecánicos operan prácticamente con la misma tecnología, desarrollada en el siglo IX, mientras que los nuevos están más adaptados a la variabilidad del viento. También se usan sistemas eólicos eléctricos para bombeo de agua, los que generalmente no requieren baterías. Al comparar sistemas mecánicos y eléctricos para bombeo de agua, se puede decir que los primeros son más baratos y que pueden operar a velocidades del viento más bajas. Adicionalmente, su mantenimiento es más simple y barato. Sin embargo, los sistemas eléctricos tienen la ventaja de que la turbina no tiene que instalarse en el sitio del pozo, sino en un punto más ventoso.
- **Aplicaciones Térmicas:** La energía mecánica de una máquina eólica se puede transformar directamente en térmica por dos mecanismos: calentamiento de agua por rozamiento mecánico o compresión del fluido refrigerante de una bomba de calor. En ambos casos, el calor producido se puede enviar, a través de un cambiador de calor, a un sistema de calefacción convencional. Sin embargo, el desarrollo de este tipo de aplicación no ha resultado económicamente factible. Es más costo-efectivo generar electricidad de alta calidad, pues se puede aplicar en diferentes casos, que construir un sistema eólico sólo para una aplicación térmica.
- **Sistemas Autónomos:** Este tipo de sistemas se refiere a uno de generación eléctrica para una vivienda. Generalmente, cuenta con un pequeño aerogenerador, baterías para almacenar la energía generada, regulador de carga y descarga de las baterías. El funcionamiento y los componentes de este tipo de instalación son muy similares a los sistemas fotovoltaicos autónomos.
- **Sistemas Híbridos:** Pequeñas turbinas eólicas brindan una solución atractiva para la electrificación rural en muchos lugares, por su operación económica y simple. Sin embargo, la fluctuación del viento no permite obtener una producción de electricidad constante. Por esta razón, frecuentemente, se usa una turbina eólica en combinación con otra fuente de generación; por ejemplo, paneles fotovoltaicos o un generador eléctrico a base de diesel. Este tipo de sistema se llama un “sistema híbrido”. La mayor ventaja de un sistema híbrido es que provee mayor confiabilidad para la generación eléctrica comparado con uno individual.

- **Sistemas Conectados a la Red:** También existe la oportunidad de suministrar energía a la red con pequeños sistemas eólicos. Esto es aplicable en los casos en que exista una red en las proximidades del centro de consumo. En este esquema, la energía requerida por el usuario sería suministrada por el sistema eólico y por la red eléctrica. Si el aerogenerador produce energía en exceso, se entrega el excedente a la red eléctrica y, si se produce menos energía de la requerida, se toma de la red.

### 1.1.4 Parques eólicos

Un parque eólico se define como un conjunto de generadores eólicos conectados entre sí para inyectar energía eléctrica a un sistema eléctrico. En este contexto los principales desafíos de un parque eólico conectado a un sistema eléctrico son dos:

- Mantener un nivel de tensión dentro de los márgenes permitidos por el sistema.
- Mantener el balance de potencia entre los generadores y los consumidores.

El primer punto ha sido enfrentado por ingenieros desde el comienzo de los sistemas eléctricos, donde existen diversas soluciones tecnológicas para solventarlo. Tales como generadores con reserva en giro, condensadores de alta potencia-baja energía, etc. En síntesis son soluciones de alta potencia, pero de baja energía que compensan variaciones en la red por lapsos de hasta algunos minutos.

Por otro lado, el segundo punto añade nuevos desafíos para la ingeniería eléctrica. Antes del surgimiento de las ERNC los sistemas eléctricos estaban constituidos por centrales despachables, i.e. la cantidad de energía inyectada por cada central es decidida por el operador por lo que se puede decir que para balancear la potencia sólo existía como variable de entrada la demanda del sistema. Sin embargo al conectar generadores eólicos al sistema se aumenta la variabilidad de la potencia de generación disponible del sistema producto de la característica variable del viento.

En base a esta operación los parques eólicos no pueden concretar contratos con clientes, dado que no pueden asegurar energía ni potencia para un tiempo predeterminado. Es así como sus ingresos provienen de la venta en el mercado spot y/o de subvenciones por temas ecológicos (bonos de carbón o exigencias reguladoras).

Sin embargo, inclusive vendiendo al mercado spot cuando existe viento no siempre presenta ingresos debido a que no siempre es aceptada la energía. Esto puede deberse a congestión en el sistema de transmisión o discordancia entre la demanda (superávit de potencia eólica durante baja demanda). Más aún los ingresos se ven disminuidos ya que la producción tampoco concuerda cuando existen precios altos en el mercado spot.

Además la variabilidad de las fuentes eólicas, dependiendo del nivel de penetración, puede aumentar el costo de operación por la necesidad de fuentes de despacho rápido para realizar regulación de frecuencia primaria.

Ante estas problemáticas la literatura especializada ha propuesto como solución los sistemas de almacenamiento energético (SAE). Sin embargo, los costos de estas tecnologías actualmente son

muy elevados. Es por eso que en su aplicación se propone la optimización de su dimensionamiento y/o operación.

En este trabajo se estudia el dimensionamiento óptimo de sistemas de almacenamiento energético con el objetivo de maximizar la utilidad del parque eólico desplazando carga, i.e. almacenando energía durante períodos de precios bajos e inyectándola durante períodos de precios altos.

### **1.1.5 Situación Actual de la energía eólica**

El uso de los sistemas eólicos domiciliarios se centra principalmente en la electrificación de viviendas rurales o bien en aquellas emplazadas en lugares aislados sin posibilidad de acceder a la red eléctrica, y no se permite actualmente inyectar a la red.

Diferente es el caso de los parques eólicos, los cuales han tenido un importante desarrollo en nuestro país, debido principalmente al éxito de los proyectos desarrollados y también a la entrega en vigencia de la Ley de fomento de ERNC, lo que permitió aumentar considerablemente el interés e inversión en este tipo de tecnologías.

A continuación, en la tabla 1-2, se detallan los parques eólicos en operación.

Tabla 1-2: Parques eólicos en Chile

Central	Región	Potencia neta	Sistema	Ingreso
Alto Baguales	XI	2,0	Aysén	2001
Canela I	IV	18,2	SIC	2007
Canela II	IV	60	SIC	2009
Cristoro Lebu	VII	3,6	SIC	2009
Ampliación Lebu		3		2011
Monte Redondo	IV	38	SIC	2009
Ampliación Monte		10		2011
Tototal	IV	46	SIC	2009

## Panorama general sobre energía eólica en Chile

Cabo Negro	VII	2,3	Aislado	2010
Punta Colorada	IV	20	SIC	2012
El Toqui	X	1,5	Aislado	2011

### 1.2 Beneficios de la energía eólica

Las principales ventajas son:

- Su impacto al medio ambiente es mínimo: no emite sustancias tóxicas o gases, por lo que no causa contaminación del aire, el agua y el suelo, y no contribuye al efecto invernadero y al calentamiento global. La producción de energía por medios eólicos no presenta incidencia alguna sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad, ya que no se produce ninguna contaminación que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierra.
- El viento es una fuente de energía inagotable y abundante. Se estima que, teóricamente, existe el potencial eólico para suplir 15 veces la demanda actual de energía en el mundo.
- La tecnología no usa combustibles y el viento es un recurso del propio país, por lo que es una de las fuentes más baratas: cuando existe potencial comercialmente explotable puede competir en rentabilidad económica con otras fuentes tradicionales como las centrales térmicas de carbón (consideradas el combustible más barato) o, incluso, con la energía nuclear, la cual tiene un impacto ambiental mucho mayor.
- En comparación con otras tecnologías aplicadas para electrificación rural, la operación de un sistema eólico es económica y simple. El sistema no requiere mayor mantenimiento, aparte de una revisión periódica de las baterías, en caso de tenerlas, y una limpieza de las aspas en épocas secas.

### 1.3 Restricciones de la energía eólica

En cuanto a las desventajas de la energía eólica, se pueden mencionar las siguientes:

- La variabilidad del viento: para proyectos aislados se requiere de un mecanismo de almacenamiento en batería de la energía generada, para poder disponer de energía cuando no haya suficiente viento. Esto representa un costo adicional al sistema. Para parques eólicos la variabilidad del viento impacta en la calidad de la electricidad que se pueda entregar a la red eléctrica; la estabilidad del voltaje y la frecuencia.
  - A pesar de los buenos avances en el diseño de las turbinas eólicas para disminuir el impacto de la variabilidad del viento, ésta representa un riesgo en la inversión

al no poder suplir los compromisos; adicionalmente, no se puede disponer de energía siempre que el sistema lo demande.

- El alto costo inicial: en comparación con fuentes térmicas de generación, un proyecto eólico tiene un alto costo inicial. Si bien, a lo largo de su vida útil puede resultar más económico por sus bajos costos de operación y mantenimiento, la inversión inicial requerida puede ser una barrera para la realización del proyecto, sobre todo en zonas rurales aisladas.
- Cantidad de viento: es una opción factible y rentable sólo en sitios con suficiente viento, lo cual significa que no se puede aplicar en cualquier lugar. El impacto visual: desde el punto de vista estético, produce un impacto visual inevitable, ya que, por sus características, precisa emplazamientos físicos que normalmente evidencian la presencia de las máquinas (cerros, colinas, litoral). En este sentido, el desarrollo del parque eólico puede producir una alteración sobre el paisaje.

## **1.4 Proyecciones futuras**

La política energética nacional pretende conciliar tres objetivos: seguridad de suministro, eficiencia económica de dicho suministro y sustentabilidad ambiental en el desarrollo del sector. Diversificar las fuentes de generación, y reducir la dependencia externa para un desarrollo sustentable del sector eléctrico y así tener impactos ambientales inferiores a las formas tradicionales de generación eléctrica. Los acontecimientos de los últimos años han reforzado la importancia de la seguridad de suministro como un objetivo estratégico fundamental.

La Agenda de Energía tiene dentro de sus metas, fomentar el uso eficiente de la energía como un recurso energético, estableciendo una meta de ahorro de 20% al año 2025, considerando el crecimiento esperado en el consumo de energía del país para esa fecha. La implementación de distintos planes, campañas y programas, así como la futura Ley de Eficiencia Energética apunta a lograr al 2025 un ahorro total de 20.000 GWh/año, lo que equivale a una capacidad instalada a carbón de 2.000 MW.

## **1.5 Contexto internacional**

Desde los 90, se observa a nivel internacional un notable aumento de la participación de las ERNC en los mercados energéticos. A comienzos de 2007, la capacidad instalada de generación eléctrica con ERNC alcanza los 182 GW a nivel mundial, equivalente a un 4 por ciento de la capacidad instalada total (4.100 GW).

Este aumento es resultado de la introducción de mecanismos de incentivos para las ERNC en diversos países. La motivación para los países de invertir en este sector se debe, entre otras razones, a la necesidad de diversificar las fuentes energéticas para lograr una mayor independencia de las importaciones, una mayor seguridad en el suministro y en abordar aspectos relacionados con el desarrollo sustentable.

## 2 Sistemas de almacenamiento de energía

La generación eléctrica por energías renovables está asociada al carácter intermitente de los recursos necesarios para producir energía. Se pueden nombrar como ejemplos claves la energía solar y la eólica. El almacenamiento de energía permitiría a sistemas con energías renovables aportar capacidad firme en momentos en que la generación renovable no cuenta con los recursos necesarios.

Para esto, el sistema de almacenamiento se carga mientras que los recursos energéticos estén disponibles y, cuando no lo estén, el sistema de almacenamiento entrega la energía acumulada.

Como existen horarios punta y valle, el proceso anterior se puede aplicar de la siguiente manera. Si los recursos están disponibles, se puede generar con energía renovable en horarios valle para sólo cargar los sistemas de almacenamiento. En horarios punta, esta energía almacenada se descarga. Esto logra achatar la curva de carga en horarios punta, con lo que se baja el precio de la energía.

Además, al poder entregar energía cuando los recursos para generar no están, el uso de almacenamiento energético ayuda a reducir los impactos negativos que tiene una rápida caída en la generación de energía, característica típica de generación renovable como la solar o eólica.

Existen varios sistemas de almacenamiento de energía, de los cuales se estudiarán, pilas de combustible hidrógeno, sistemas BESS, hidroelectricidad bombeada y aire comprimido.

### 2.1 Pilas de combustibles hidrógeno

Las pilas de combustible o celdas de combustible son unos dispositivos electroquímicos, capaces de convertir directamente la energía química contenida en un combustible en energía eléctrica. Esta transformación electroquímica (sin combustión) permite conseguir rendimientos relativamente altos (en la práctica en el entorno del 40 o 50%, aunque en teoría podrían ser bastante superiores). Se presentan como unos dispositivos con enorme potencial de aplicación.

A diferencia de la pila eléctrica o batería, una pila de combustible no se acaba ni necesita ser recargada, funciona mientras el combustible y el oxidante le sean suministrados desde fuera de la pila.

Fundamentalmente una pila de combustible es un apilamiento (con conexiones internas en serie) de células o celdas individuales. Estas celdas están formadas por dos electrodos (ánodo y cátodo) donde se producen respectivamente la oxidación del hidrógeno y la reducción del oxígeno, y por un electrolito (que puede ser un medio tanto ácido como básico) que permite el intercambio de los iones que generan ambas reacciones. Uniendo cada dos celdas existe un elemento de unión, denominado normalmente placa bipolar (que además facilita la canalización de los gases) que permite la circulación de los electrones, que pasando por el circuito externo, completan las reacciones.

La figura 2-1 muestra el funcionamiento de la pila de combustible hidrogeno.

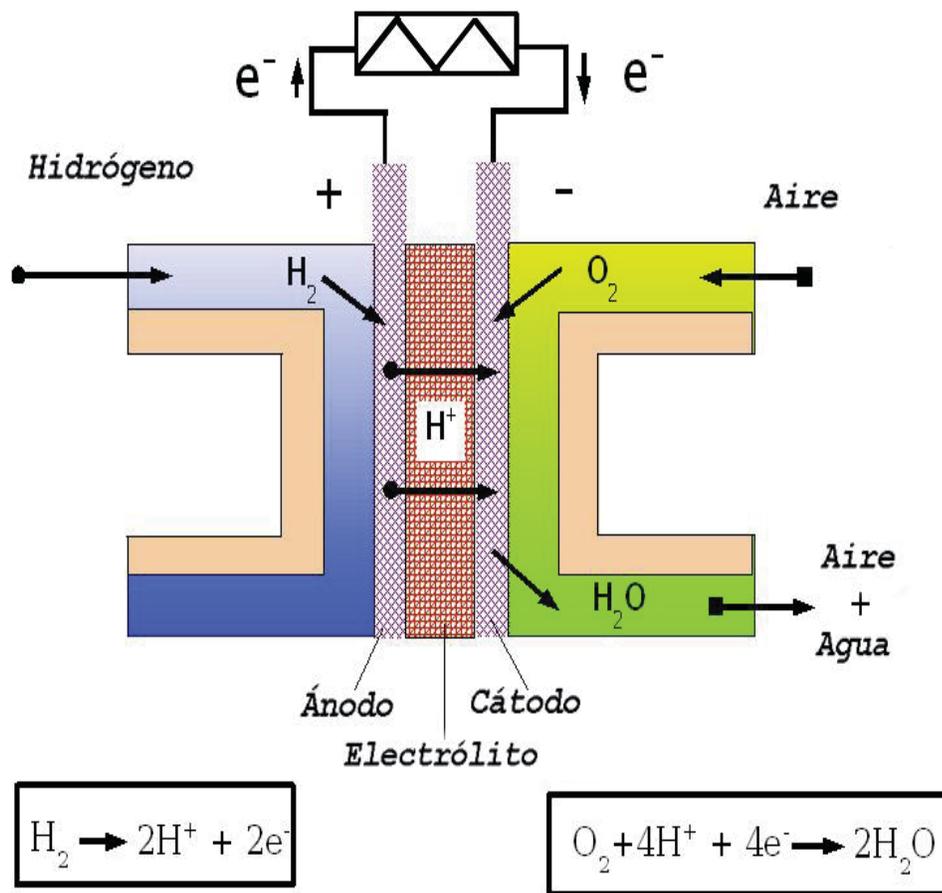


Tabla 2-1. Figura Pila de Combustible Hidrogeno.

Los sistemas de pilas de combustible se caracterizan por sus reducidas emisiones. Si solo se utiliza hidrógeno (derivado de fuentes renovables) como combustible en las celdas, se obtendrá vapor

de agua y electricidad. La utilización de hidrocarburos para la producción de hidrógeno eliminaría prácticamente las emisiones de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono. Considerando que sus eficiencias son potencialmente superiores a las de los motores de combustión interna, las emisiones de dióxido de carbono se verían además reducidas.

Las pilas de combustible pueden ofrecer la respuesta a diversos requerimientos energéticos. La eficiencia de estos dispositivos no depende del tamaño como sucede en otros sistemas energéticos. Su eficiencia es potencialmente superior a cualquier otro sistema, haciéndolas particularmente atractivas para aplicaciones estáticas de alta o baja energía. Las pilas de combustible alimentadas por hidrógeno son silenciosas y, además de electricidad y calor, sólo producen agua como residuo.

### **2.1.1 Almacenamiento de energía eólica en pilas de combustible hidrógeno**

El problema de energías renovables como la eólica es que no siempre llega la fuente de energía, es decir, que se hace de noche y el viento deja de soplar. La solución es lograr un método eficiente de almacenamiento de la energía en los momentos en que se produce de sobra.

Un posible modo para almacenar la energía eléctrica generada en un parque eólico, consiste en transformarla en hidrógeno.

La energía eléctrica que se desea almacenar se deriva hacia un electrolizador, que es un dispositivo en el que el paso de la corriente eléctrica disocia agua en sus dos componentes: oxígeno ( $O_2$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ). El  $H_2$  obtenido se comprime para hacer más fácil su almacenamiento, mientras que el  $O_2$ , que no tiene contenido energético, se libera a la atmósfera, de la que ya es componente.

El  $H_2$  se mantiene almacenado en recipientes a presión hasta el momento en el que debe emplearse para generar energía eléctrica en situaciones de demanda o necesidad de gestión.

### **2.1.2 Beneficios y restricciones del almacenamiento por pila de hidrógeno.**

Los principales beneficios de este método son los siguientes:

- Alta eficiencia.
- No emiten  $CO_2$  a la atmósfera.
- Pueden usar combustibles renovables.
- Funcionan de forma continua en tanto el combustible esté disponible.
- Proveen de energía base y pueden ser un buen complemento a las energías renovables.
- No tienen partes móviles por lo que su mantenimiento es sencillo.
- No emiten ruido.
- El hidrógeno puede obtenerse del agua.
- Tamaño muy adaptable según necesidades: desde la batería de un móvil hasta una central de producción eléctrica.

Las restricciones del método se nombran a continuación:

- Coste elevado.
- La fiabilidad todavía está en desarrollo.
- Corta vida útil, sobre todo en aquellas que trabajan a altas temperaturas.
- Es difícil encontrar hidrógeno como combustible.
- La industria del hidrógeno es pequeña.

## 2.2 Sistemas de Bombeo

La tecnología de almacenamiento de energía por bombeo es la más madura de todas, se ha utilizado desde los años veinte. Se basa en almacenar energía mediante el bombeo de agua desde un embalse inferior o río hasta un embalse superior. El desnivel adecuado que se debe de dar entre los dos embalses para que dicha tecnología sea eficiente debe de ser de al menos 100 m.

El bombeo del agua del embalse inferior al superior se da en las horas valles, es decir por la noche, de esta forma se utiliza la energía sobrante para hacer funcionar la turbina y así subir el agua y almacenar la energía. Durante el día, cuando la demanda de electricidad es mayor, la central actúa como una central hidroeléctrica convencional, el agua del embalse superior cae por la galería de conducción hasta la central donde se encuentra el generador y los transformadores que pasan la energía mecánica a energía eléctrica que a su vez es transportada a los hogares e industrias por las líneas de transporte.

Existen dos tipos de centrales de bombeo, las centrales de bombeo puro, donde es necesario bombear inicialmente agua desde el embalse inferior al superior (Circuito de agua cerrado) y centrales de bombeo mixto, donde se puede producir energía con o sin bombeo previo en circuito de agua cerrado o abierto.

### 2.2.1 almacenamieto de energía eólica por bombeo de agua

La central de bombeo de agua integra un parque eólico, el cual es capaz de suministrar energía eléctrica directamente a la red y, simultáneamente, alimentar a un grupo de bombeo que embalse agua en un depósito elevado, como sistema de almacenamiento energético. La central hidroeléctrica aprovecha la energía potencial almacenada, garantizando el suministro eléctrico y la estabilidad de la red.

El parque eólico realiza la captación y transformación de la energía eólica en energía eléctrica.

El sistema hidráulico funcionando como bombeo, hace de acumulador del excedente de energía; funcionando como generador, actúa como productor de energía eléctrica y regulador del sistema eléctrico.

La ilustración 2-3 muestra una central hidroeléctrica de bombeo, donde el parque eólico energiza la estación de bombeo, de modo que el agua pase desde el depósito inferior al superior.

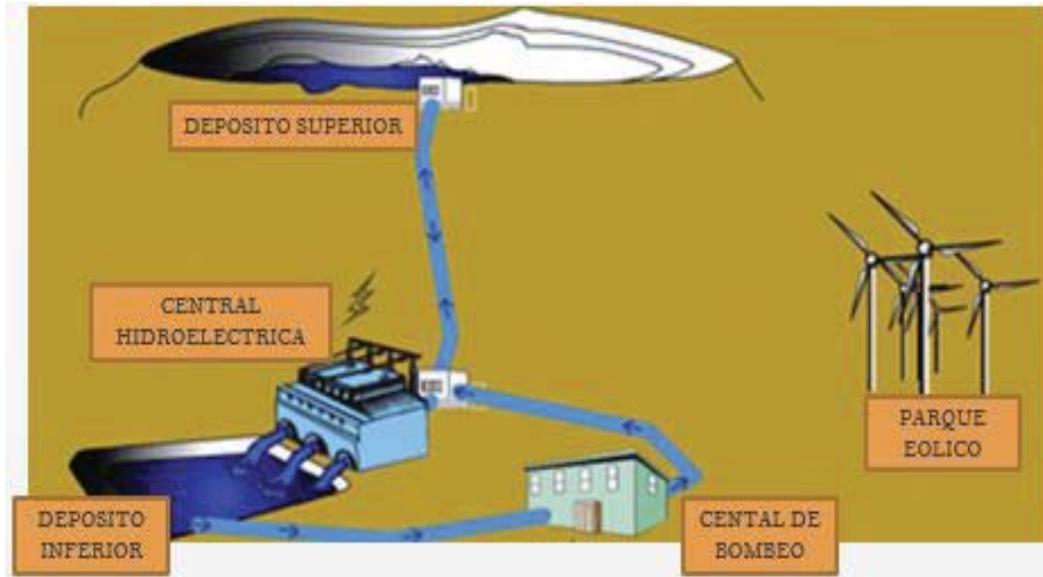


Figura 2-3. Central hidroeléctrica de bombeo.

Este método de almacenamiento ya está siendo utilizado en forma comercial en el mundo. El año 2009, a nivel mundial, la capacidad de almacenamiento por este método era de 104GW. De esto, la Unión Europea aporta con 38,3GW (36,8% de la capacidad mundial) y Japón con 25,5GW (24,5% de la capacidad mundial).

Al año 2010, EEUU contaba con 21,5GW de capacidad por este método, logrando el 20,6% de la capacidad mundial.

### 2.2.2 Beneficios y restricciones del almacenamiento de energía por bombeo

Los beneficios más destacados de este método son los siguientes:

- Eficiencia de almacenamiento de energía del 70%.
- Requiere bajo mantenimiento.
- Solución de larga duración.

Las restricciones que presenta este método se nombran a continuación:

- Limitaciones geográficas
- Elevado coste de la instalación hidráulica y de los equipos hidráulicos, eléctricos y cañerías.
- Elevado coste en redes de transporte o distribución.
- Fuerte impacto ambiental por la construcción de las presas.

### 2.3 Almacenamiento de energía por aire comprimido

El almacenamiento de energía con aire comprimido es un método no solo eco-eficiente y limpio, sino económico. En 1973 se instaló en Alemania la primera planta de almacenamiento de energía

en aire comprimido, haciendo uso de las cuevas naturales del subsuelo como almacén. Más tarde se han ido instalado posteriores plantas similares en Estados Unidos.

La filosofía de este tipo de plantas se basa en aprovechar la energía eléctrica sobrante y de bajo coste para comprimir el aire en un almacenamiento subterráneo, y más tarde utilizarlo para alimentar una turbina generadora para alimentar a la red eléctrica durante los periodos de alta demanda energética.

Entrando en algunos detalles de funcionamiento, el aire se comprime de forma escalonada, con enfriamientos intermedios, con lo cual se consigue un buen rendimiento en la etapa de almacenamiento de energía en los períodos en los que la red tiene excedente de energía.

Este método consiste en inyectar aire comprimido en un punto del subsuelo especialmente diseñado para ello cuando las necesidades energéticas son bajas y extraerlo cuando la demanda energética es alta, recuperando así la energía que se produce al expandirse mediante una turbina.

Se suele utilizar en ciclos diarios, cargando durante el día y descargando durante la noche; de ahí que sean muy útiles para operar con los excedentes de generación de un parque eólico.

Este tipo de sistemas presentan un rendimiento similar al de los sistemas que utilizan técnicas de almacenamiento energético por bombeo, en torno al 70-75%.

Permiten el almacenamiento de energía a gran escala y por largos periodos de tiempo (más de un año), sin repercutir en pérdidas considerables. La vida media de una planta de este tipo es bastante elevada, por encima de los 25 años.

Aunque su capacidad de respuesta ante la demanda es elevada, el sistema CAES está todavía por debajo de otros sistemas como las centrales hidráulicas de bombeo.

La ilustración 2-4 muestra una central de aire comprimido, donde el parque eólico alimenta el motor para que el aire pueda ser comprimido.

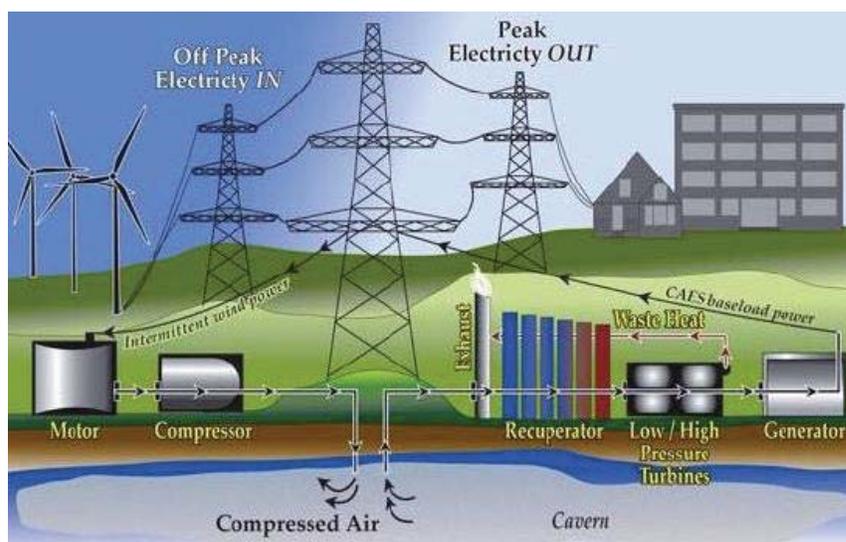


Figura 2-4: Central de aire comprimido.

Sólo existen dos plantas de almacenamiento energético por aire comprimido a nivel comercial en el mundo:

Una en Huntorf (Alemania), que es la primera planta en utilizar tecnología de aire comprimido como sistema de almacenamiento energético y sigue todavía en funcionamiento. Esta planta utiliza como reserva cavidades naturales. Tiene una capacidad de 321 MW eléctricos y ha demostrado su capacidad para suavizar la variabilidad de energía eléctrica generada por una planta eólica.

Por otro lado, en McIntosh (Estados Unidos), existe otra planta en funcionamiento desde 1991, de 110 MW eléctricos. En este caso incorpora un recuperador para precalentar el aire.

### 2.4 Sistemas BESS

La mayor incorporación de fuentes variables de energía como se mencionó anteriormente implica aumentar la flexibilidad de los sistemas eléctricos, para ello existen diversas opciones como realizar interconexiones, aumentar la capacidad de generación tanto en centrales de gas como en hidroeléctricas, sistemas de almacenamiento o establecer combinaciones de estas opciones. En específico, los sistemas de almacenamiento de energía han probado ser una alternativa viable sobretodo porque permiten evitar el aumento de la capacidad y reserva de los generadores del sistema.

El almacenamiento por baterías o BESS (Battery Energy Storage System) es uno de los sistemas que posee la mayor flexibilidad en cuanto a la respuesta de carga y descarga, además de tener altos niveles de eficiencia. Estos corresponden a un conjunto de celdas conectadas en serie, paralelo, o ambas configuraciones a la vez. Las cuales tienen la capacidad de almacenar la energía en forma electroquímica.

Junto con las celdas, el sistema BESS está conformado por un sistema de conversión de potencia (PCS, por su singlas en inglés) y un sistema de monitoreo de batería (BMS). Los cuales se encargan de controlar los niveles de voltajes, temperatura, tasa de carga, etc.

El BESS no puede ser conectado directamente a la red de alta tensión, por lo general es conectado mediante un autotransformador el cual regula la tensión a la cual se conecta el PCS, el que a su vez es protegido mediante un interruptor de media tensión en caso de fallas.

El PCS incluye un inversor bidireccional, el cual le permite operar al BESS en los cuatro cuadrantes de energía, entre sistemas de corriente directa y alterna. Durante la descarga el convertidor funciona en modo inversor y durante la carga como rectificador. También contiene un conjunto de sofisticadas protecciones las cuales se encargan de proteger el equipo.

Existen distintas implementaciones de BESS cada una con características técnicas propias al desarrollarse con baterías de diferentes tipos como Ion-litio, níquel, plomo-ácido, sulfuro de sodio y flujo redox. Es por ello que son implementados según la aplicación y los criterios de ciclos de carga y descarga, costos, etc. Entre las aplicaciones se pueden encontrar como se ha planteado asociados a ERNC, pero también en redes aisladas y sistemas más grandes realizando funciones

como nivelación de carga, en servicios auxiliares como reserva, sistema de alimentación ininterrumpida, reducción de punta de la demanda, y otros.

Las centrales eólicas son atractivas para la implementación de sistemas de almacenamiento de baterías debido a su intermitencia por la condición del viento. El flujo de potencia de estas centrales no es constante y a través de BESS se podría entregar una potencia dada por un tiempo prolongado. Además, surge la posibilidad de utilizar este sistema para vender energía que los generadores eólicos generan en momentos que la energía esté más cara, lo que se conoce como desplazamiento de energía.

Esta aplicación, como se señaló, permite desplazar el momento de entrega de energía al sistema interconectado, sacando provecho de hacerlo cuando sea más cara. Esto tiene respaldo si se considera que los generadores eólicos y también los solares en Chile principalmente venden su energía en el mercado spot, por tanto lo hacen al costo marginal del sistema interconectado.

Cabe considerar que la incorporación de este sistema significaría un beneficio para el sistema en el sentido que permitiría que en las horas punta se necesitara una menor cantidad de centrales convencionales que son más caras, para suplir la rampa de consumo.

La potencia que entrega una central eólica en un instante dado está determinado por la velocidad del viento, la cual se modela como una variable estocástica con su respectiva distribución probabilística generalmente Weibull entre otras. El comportamiento del viento puede tener ciertas tendencias si se asocia a ciertos lugares y horas del día, como sucede generalmente en las costas durante el día donde la gran diferencia de temperatura entre la tierra y el mar genera corrientes de convección y produce fuertes vientos.

La idea del sistema BESS junto con una central eólica, es que el sistema de baterías se cargue diariamente con energía eólica durante las horas en que el precio spot dado por el costo marginal del sistema interconectado sea menor, para luego entregar la energía en los momentos que el precio sea mayor.

Se debe tener en cuenta, que la configuración propuesta implica entregar una menor cantidad de energía al sistema, ya que los procesos de carga y descarga del BESS tienen pérdidas. Esto significa que la energía total que entrega el generador eólico por sí solo es mayor que la que entregará en funcionamiento conjunto con el sistema de almacenamiento. Además, se tiene que considerar que la capacidad y tamaño del BESS debe considerar factores que no disminuyan la vida útil de las baterías como que la potencia para cargar del BESS multiplicada por la eficiencia del dispositivo no exceda la potencia de descarga nominal del sistema de baterías.

### **2.4.1 Acumulador de litio**

El litio es el más ligero de los metales, tiene gran potencial electroquímico y alta energía específica por peso. Específicamente, la celda de ion de litio está compuesta de celdas que emplean compuestos de intercalación de litio como los materiales positivos y negativos. Al realizar un ciclo, los iones de litio se intercambian entre el electrodo positivo (cátodo) y negativo (ánodo). El material del cátodo varía según el tipo de tecnología de litio y se encuentra recubierto de una

lámina de aluminio. El material del ánodo es típicamente grafito, el cual se reviste sobre una lámina de cobre. El electrolito conductor iónicamente es generalmente de tipo líquido y está hecho de una solución de sales de litio en disolventes. El separador aislante está hecho con capas compuestas de polietileno y polipropileno, que se coloca entre el ánodo y el cátodo para evitar un cortocircuito.

En el proceso de carga y descarga, los iones de litio se insertan o se extraen desde el espacio intersticial entre las capas de los materiales activos. Durante la carga, los iones de litio fluyen del electrodo positivo al negativo, a través del electrolito y los electrones fluyen en la dirección opuesta, a través del circuito externo. El flujo de iones se detiene cuando el acumulador está cargado completamente. Durante la descarga, los iones fluyen hacia atrás, desde el electrodo negativo al positivo y los electrones fluyen de forma opuesta. La figura 2-5 muestra el proceso de carga y descarga del almacenamiento de litio, el cual se resume en cuatro pasos.

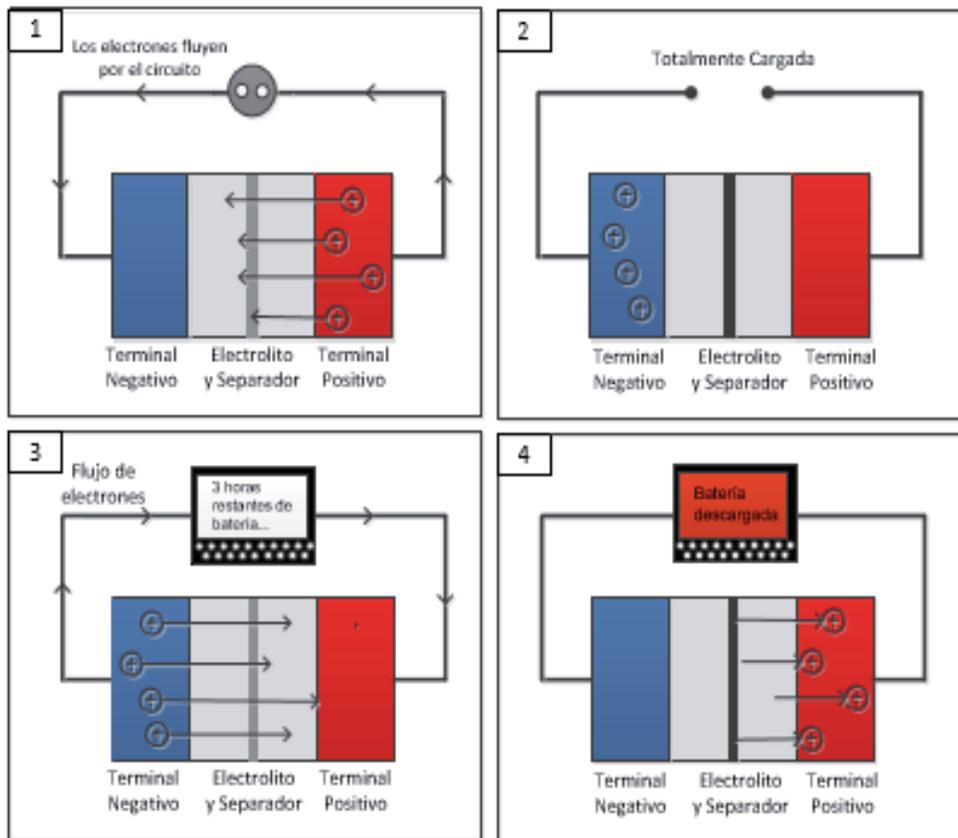


Figura 2-5: Ciclo de carga/descarga del acumulador de ion litio.

Los fabricantes están constantemente mejorando la química de la tecnología de litio, obteniendo nuevas y mejoradas combinaciones químicas. La diferencia entre cada tecnología de litio es principalmente el material del cátodo, el cual puede ser dióxido de cobalto de litio, óxido de manganeso de litio (conocido como “spinel” o manganato de litio), litio níquel manganeso cobalto (NMC) y litio óxido de níquel cobalto aluminio (NCA). Las tecnologías de litio ferrofosfato

(LiFePO<sub>4</sub>) y litio polímero son incluidas como variantes de las tecnologías de iones de litio, ya que recientemente incluyen este material no metálico para evitar las inestabilidades del metal de litio.

Debido a que la tecnología de litio puede tener una variedad de materiales de cátodo y ánodo, la densidad de energía y tensión variará en consecuencia. Pero en general, estas cuentan con alta capacidad, buenas características de carga y una curva de descarga constante que ofrece una efectiva utilización de la potencia almacenada a una tensión deseada. Otras ventajas son:

- Alta energía específica y densidad de energía.
- Maneja cientos de ciclos de carga y descarga.
- Capacidad de carga rápida.
- Capacidad de alta tasa y potencia de descarga.
- Relativamente baja auto descarga.
- Amplio rango de temperatura de operación, lo que permite su uso en una amplia variedad de aplicaciones.
- No tienen efecto memoria.
- Alta eficiencia energética.
- Bajo mantenimiento.
- Son livianas.

En general, las desventajas de la tecnología de ion litio son:

- Requiere un circuito de protección, el cual limita la tensión y la corriente.
- Sujeta a envejecimiento, incluso si no está en uso.
- Se degradan mucho más rápido si se expone al calor, debido a que son extremadamente sensibles a las altas temperaturas.
- Se arruinan si están completamente descargadas.
- El costo de la tecnología es relativamente alto.
- Existe un riesgo pequeño, si no está fabricada apropiadamente porque puede ser inflamable.

### 2.4.2 Acumulador de plomo ácido

En teoría, la tecnología de plomo ácido produce energía a través de reacciones electroquímicas del dióxido de plomo y del plomo con el ácido sulfúrico. El material activo del electrodo positivo es el óxido de plomo y del electrodo negativo, es plomo metálico, una estructura altamente porosa para facilitar la formación y disolución del plomo. Los electrodos están sumergidos en una solución electrolítica de ácido sulfúrico y de agua. Para que los electrodos no entren en contacto por movimientos físicos, existe un aislamiento eléctrico con una membrana química permeable, la cual evita cortocircuitos a través del electrolito.

El almacenamiento de energía se realiza a través de reacciones químicas reversibles. La descarga causa la formación de cristales de sulfato de plomo en los terminales positivo y negativo; utiliza sulfato del electrolito de ácido sulfúrico y como resultado, el electrolito está menos concentrado. La descarga total causa que ambos electrodos estén cubiertos con sulfato de plomo y agua, en

lugar de ácido sulfúrico. La reacción de carga en el electrodo negativo convierte el sulfato de plomo en plomo y en el terminal positivo, convierte el plomo en óxido de plomo. La conversión de sulfato de plomo es la reacción dominante, sin embargo, también la corriente de carga electroliza el agua desde el electrolito y se producen gases de hidrógeno y oxígeno, en un proceso conocido como la gasificación.

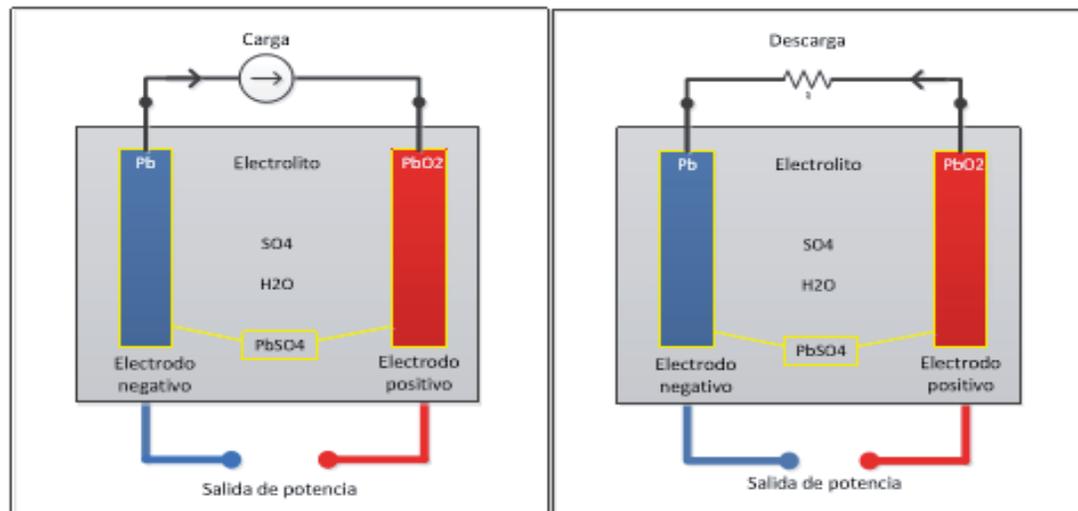


Figura 2-6: Ciclo de carga/descarga del acumulador de plomo ácido.

Las tecnologías de plomo ácido se basan en la misma reacción química y pueden variar en términos de costos, método de fabricación y funcionamiento. Existen dos categorías principales, las de flujo y las valvo-reguladas. Las de Ventilación o Flujo o VLA (en inglés Vented Lead Acid) es la tecnología tradicional de plomo ácido, los electrodos están inmersos en depósitos de electrolito líquido. Se utiliza para automóviles y muchas aplicaciones industriales. La Sellada o Valvo-regulada de Plomo Ácido o VRLA (en inglés Vented Regulated Lead Acid) han tenido un éxito limitado en aplicaciones industriales con respecto a las convencionales VLA, debido a su vida útil más corta y la intolerancia al abuso. La celda VRLA es mucho más sensible a las variaciones de temperatura, es mucho menos tolerante a la sobrecarga o sub-descarga y requiere carga flotante en un rango de tensión muy estrecho.

La gran ventaja de la tecnología de plomo ácido en muchas aplicaciones es el precio bajo, la fácil fabricación en base a lugar geográfico, el buen funcionamiento y las buenas características de vida útil. Otras ventajas son:

- Disponibilidad en grandes cantidades, en variedad de tamaños y diseños.
- Confiabilidad por 140 años de desarrollo.
- Robusta, tolerante al abuso.
- Tolerante a la sobrecarga.
- Entrega corrientes muy altas.
- Calendario de vida indefinido, si es almacenada sin electrolito.
- Funcionamiento moderado a altas y bajas temperaturas.

- Se puede dejar en carga flotante por periodos prolongados.
- Fácil indicación del SOC.
- Buena retención de carga para aplicaciones con carga intermitente.
- Disponibilidad de diseños que no requieren mantenimiento.
- Los componentes de la celda son fácilmente reciclados.

Entre las desventajas se encuentran:

- Densidad de energía limitada.
- El almacenamiento a largo plazo en condición de descarga puede llevar a la irreversible polarización de los electrodos (sulfatación)
- La producción de hidrogeno en algunos diseños puede causar la explosión.
- El estirbena y arsina en diseños con aleaciones de antimonio y arsénico puede ser un peligro para la salud.
- Alta descarga interna diaria.
- Muy pesadas y voluminosas.
- Peligro de sobrecalentamiento durante la carga.
- No es adecuada la carga rápida.

### 2.4.3 Acumulador de flujo

Las tecnologías de flujo modernas constan de dos sistemas de electrolitos, en la cual dos electrolitos actúan como portadores de energía líquidos y son bombeados a través de dos semiceldas separadas por una membrana de la reacción de la celda.

Las tecnologías de flujo tienen los reactivos y productos químicos activos almacenados externamente a los dispositivos de conversión de potencia. Los sistemas en los cuales los materiales activos están disueltos en un electrolito líquido son llamadas baterías de flujo redox. Otros tipos tienen una especie de gas (hidrógeno, cloro) y líquido (bromo). Además, están las tecnologías redox de Vanadio, Vanadio-Polihaluro, Bromo-Polisulfuro, Ferro-Cloro y las de flujo híbrido, en las cuales uno o más componentes activos son almacenados internamente, como las de Zinc-Cloro y las de Zinc-Bromo. Estas últimas, tienen densidad de energía limitada por la cantidad de materiales activos que pueden ser almacenados. Algunos tipos han sido explorados extensivamente, como las de Polisulfuro-Bromo, Zinc-Bromo y Vanadio-Redox.

La tecnología de Bromuro de Zinc o ZBB ha experimentado un desarrollo importante, en general, esta tecnología está lista para la etapa de producción de algunas aplicaciones de potencia. Esta tecnología contiene dos materiales activos en la solución del electrolito: el zinc es sólido cuando carga pero se disuelve cuando es descargada, mientras que el bromo está disuelto en el electrolito acuoso.

La tecnología Flujo Redox o RFB es un sistema electroquímico donde la oxidación y la reducción implican especies iónicas en la solución y las reacciones toman lugar en electrodos inertes; significa que los materiales activos sean almacenados externamente a la celda. Uno de los principales atributos de esta tecnología es que no hay transferencia física de materiales a través

de la interface del electrolito, esto es importante para muchas aplicaciones, principalmente para aplicaciones estacionarias. Se clasifican según el electrodo positivo y negativo, los cuales comprometen la forma de almacenamiento del sistema. Las tres variantes destacadas son las de Ferro/Cromo, Vanadio/Bromo (VRB) y de Vanadio.

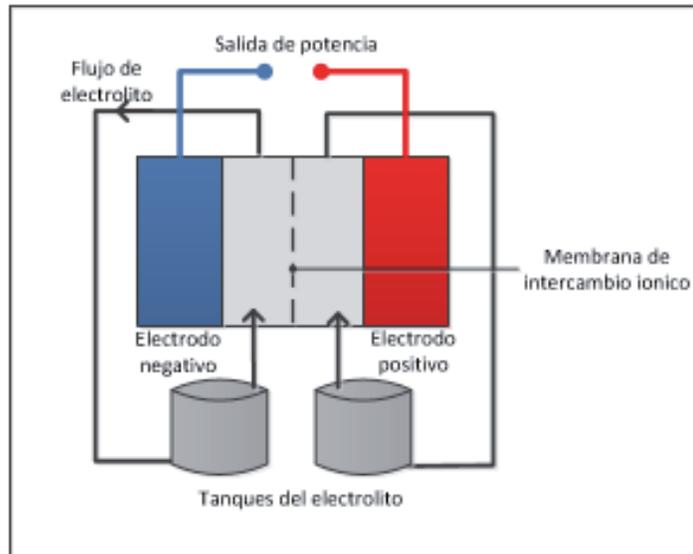


Ilustración 2-7: Estructura y ciclo de carga/descarga de la RFB

El gran aporte de la tecnología de flujo a la industria es que ha expandido la posibilidad de almacenamiento de energía electroquímica a gran escala; debido a que tiene atributos superiores a otras tecnologías: larga vida útil, manejo térmico activo y la independencia de la potencia y energía nominal. Además de otras ventajas:

- Respuesta rápida, en el orden de milisegundos.
- Un manejo térmico activo es más factible. El electrolito también actúa como un refrigerante convirtiéndose en un sistema de enfriamiento activo para el dispositivo. Esto permite una vida útil más larga de los componentes electroquímicos.
- El arreglo bipolar de la celda es práctico porque el electrodo positivo de una celda forma el electrodo negativo de la siguiente celda, permitiendo la construcción de módulos de alta tensión con resistencia interna mínima.
- La eficiencia total (en corriente directa) es un poco más alta que en las tecnologías convencionales. En parte, porque son cargadas con bajos SOC y porque tienen mejor control térmico pueden ser cargadas tan rápidamente como son descargadas.
- Son menos susceptibles a condiciones de sobrecarga, sub-descarga y estado parcial de carga.
- Los electrolitos pueden ser manejados al nivel de sistema y no por celda como en las tecnologías convencionales.
- El costo de los materiales son relativamente bajos desde una perspectiva de \$/kW y \$/kWh, porque la independencia de la energía y potencia permiten una fácil escalabilidad.

Las desventajas de la tecnología de flujo son pocas:

- Las conexiones adicionales hace que las baterías de flujo sean más propensas a tener fugas, de modo que se debe considerar los problemas de seguridad y medioambientales relacionados con la contención del electrolito.
- El equipo auxiliar requerido, como bombas e intercambiadores de calor, requieren costo inicial adicional y también un costo por reemplazo.
- El equipo auxiliar para mantener el flujo requiere potencia adicional, reduciendo la eficiencia de energía del sistema.

#### 2.4.4 Acumulador de sulfuro de sodio

En cuanto a la química de la tecnología de sulfuro de sodio, el electrodo positivo es de azufre (S), mientras que el material activo del electrodo negativo corresponde a sodio (Na). Durante la descarga, el sodio se oxida a través del cerámico de alumina-beta formando iones de sodio positivos, lo cuales migran a través del cerámico que actúa como separador y como electrolito al mismo tiempo, se combina con el azufre y forma pentasulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_5$ ). El pentasulfuro de sodio es inmisible con el azufre restante, formando así una mezcla líquida de dos fases. Después de toda la fase, el azufre libre es consumido, el  $\text{Na}_2\text{S}_5$  progresivamente se convierte en polisulfuro de sodio monofásico con un contenido cada vez más alto de azufre ( $\text{Na}_2\text{S}_{5-x}$ ). Durante la carga, estas reacciones químicas se invierten, por lo cual puede ser utilizada continuamente.

Las celdas de sulfuro de sodio tienen que estar herméticamente selladas por seguridad, también es mantenida a una temperatura de  $300^\circ\text{C}$  y opera bajo la condición que los materiales activos de los electrodos son líquidos y el electrolito es sólido. Esta tecnología presenta características internas óptimas y provee excelente funcionamiento si se mantiene la temperatura, para que los materiales reaccionen suavemente y la resistencia interna sea baja.

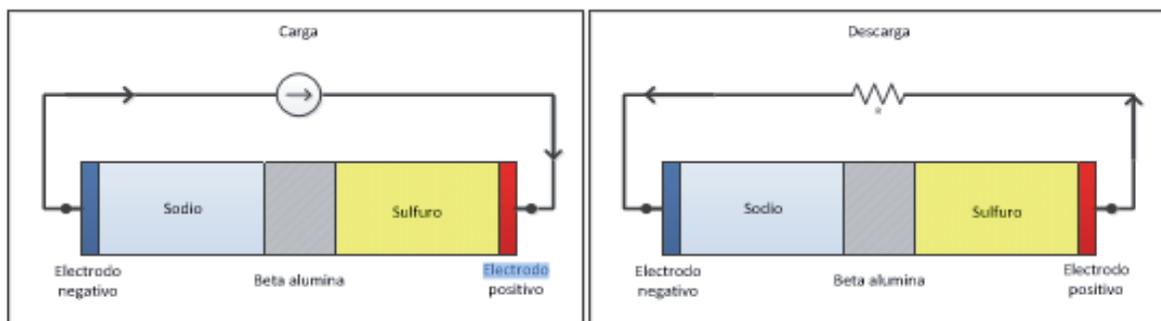


Ilustración 2-8: Ciclo de carga/descarga del acumulador de sulfuro de sodio.

El electrodo negativo de sodio en el centro está rodeado por el tubo del electrolito sólido de alumina, que a su vez está rodeado por el electrodo positivo de azufre. En la carga, el sodio líquido llena el depósito central y a medida que se descarga, el sodio líquido es canalizado a través de un espacio estrecho entre la superficie interna del electrolito sólido y el tubo de seguridad. Por el tubo de alumina beta y el diseño del electrodo de sulfuro se tiene una baja resistencia y alta

eficiencia. La capa de protección y el diseño del electrodo de sulfuro garantizan alta durabilidad. El diseño y las propiedades de la celda garantizan alta densidad de energía y el tubo de seguridad, la seguridad intrínseca.

En general, las ventajas de la tecnología son:

- Alta energía específica y densidad de energía.
- Fácil ubicación en exteriores e interiores, insensibilidad a las condiciones ambientales.
- Calendario de vida largo.
- Respuesta rápida, de carga total a descarga total en 1 milisegundo.
- Mantenimiento mínimo, operación y monitoreo remoto.
- Un diseño robusto con alta confiabilidad.
- Muy baja tasa de autodescarga.
- Alta eficiencia, sobre el 85% cuando no hay autodescarga.
- Bajo precio en masa porque hay material abundante para la producción.
- Versatilidad, amplio rango de aplicaciones, desde respuesta rápida para eventos de calidad de potencia y de horas, para nivelación de carga.
- No presenta efecto memoria.
- Como desventajas se destacan la elevada temperatura de trabajo y el costo elevado.

### 2.4.5 Acumulador de níquel cadmio

Las tecnologías de níquel tienen características de funcionamiento similar, aunque su composición es diferente en cuanto al electrodo negativo. El electrodo positivo en general, es igual en todas las tecnologías de níquel. El electrodo positivo está compuesto de hidróxido de níquel ( $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ) en forma de masa esponjosa, casi siempre, el electrolito es hidróxido de potasio acuoso ( $\text{KOH}(\text{H}_2\text{O})$ ) a una concentración entre 25% y 40% por peso. Además, hay una pequeña cantidad de hidróxido de litio ( $\text{LiOH}(\text{H}_2\text{O})$ ) para mejorar el funcionamiento del ciclo.

Una aproximación menos compleja de las reacciones que ocurren en el electrodo de níquel son: durante la carga, el hidróxido de níquel es convertido en oxi-hidróxido ( $\text{NiOOH}$ ) y en la descarga, el oxihidróxido se combina con agua para producir hidróxido de níquel y también iones de hidróxido. En caso de sobrecarga, el electrodo de níquel produce oxígeno desde el agua. En las tecnologías de níquel ventiladas, el oxígeno es ventilado a la atmósfera, sin embargo, en otro tipo de tecnologías el oxígeno es retenido en la celda y migra al electrodo negativo, donde se recombina con el material activo del electrodo.

Como electrodo negativo, el más utilizado es el cadmio, pero también se encuentran el hierro, el hidrógeno, el metal hidruro y el zinc. El cadmio como electrodo negativo proporciona alta densidad de energía y capacidad de potencia, aunque es más costoso que los otros materiales utilizados y es tóxico.

El diseño y ciclos de carga de una celda de níquel-cadmio se muestran en la Figura 2-9.

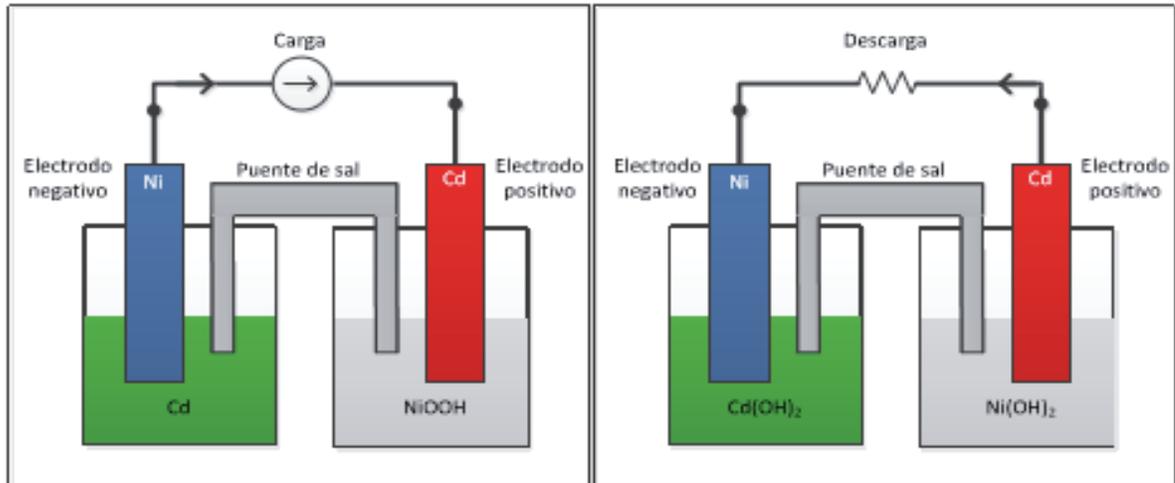


Ilustración 2-9: Ciclo de carga/descarga de la celda de Níquel-cadmio

Las ventajas que se destacan son su alta tolerancia al abuso, alta densidad de energía y requiere menos mantenimiento que las de plomo-ácido, lo cual disminuye su costo. Otras ventajas de la tecnología son:

- El proceso de carga es fuertemente endotérmico, se enfría durante la carga, lo cual hace posible la carga rápida, ya que el calentamiento y la reacción endotérmica se contrarrestan entre sí.
- Buen rendimiento de carga.
- Característica de descarga plana, pero cae rápidamente al final del ciclo.
- Tolera descargas profundas.
- Largo calendario de vida en almacenamiento. Las celdas selladas pueden estar almacenadas en estado de carga y descarga sin daño.
- Almacenamiento y transporte sencillo.
- Buen rendimiento a baja temperatura.
- Precio económico, en término de costos por ciclo.
- Disponible en una amplia gama de tamaños y opciones de operación.
- Baja resistencia interna.

Entre las desventajas:

- Energía específica relativamente baja en comparación con los sistemas más modernos.
- Necesita recargarse después del almacenamiento, alta autodescarga.
- El cadmio es un metal pesado, de costo elevado y su uso en productos de consumo es considerado obsoleto por razones medioambientales. Suelen ser constantemente monitoreadas y selladas, además se promueven esfuerzos por reciclarlas.
- Excepto en aplicaciones industriales, tienen efecto memoria.

## 2.5 Parámetros técnicos y económicos

A continuación se presenta un compendio de parámetros técnicos (Tabla 2-1) y económicos (Tabla 2-2) de las tecnologías descritas anteriormente.

Tabla 2-1. Parámetros técnicos de tecnologías de almacenamiento.

	Rango de potencia MW	Tiempo de descarga	Descarga interna por día %	Vida útil años	Eficiencia %	DOD %	Duración idónea de almacenamiento
CAES	300	1-24 hr	Poca	30 – 40	70 - 73	-	Horas – meses
PHS	1000	1-24 hr	Muy poca	30 – 50	65 - 80	-	Horas - meses
Li-ion	0 - 50	Minutos – horas	0,1 - 0,3	14 – 16	78 - 88	90	Minutos - días
Ni-Cd	0 - 40	Segundos- horas	0,2 -0,6	13 – 20	72	100	Minutos - días
Pb-acido	0 - 20	Segundos- horas	0,1 - 0,3	5 – 12	70 - 80	75	Minutos - días
Na-s	0 - 40	Segundos- horas	20	12 – 20	75 - 85	80	Segundos - horas
Celda de hidrogeno	0 - 50	1 – 24 hr	Casi nula	5 -15	70 - 80	-	Horas - meses

Donde:

- Energía nominal máxima: corresponde al máximo valor nominal de energía hallado en la literatura.
- Potencia nominal máxima: equivalente a la energía, pero en potencia nominal.
- Capacidad de ciclos: cantidad que representa la vida operativa útil de la tecnología en número de ciclos carga-descarga.
- Rangos se deben a valores mínimos y máximos encontrados en la literatura.
- Vida útil: estimada en años.
- Rangos se deben a valores mínimos y máximos encontrados en la literatura.
- Eficiencia: round-trip, presentada en porcentaje.
- Rangos se deben a valores mínimos y máximos encontrados en la literatura.
- DOD: profundidad de descarga nominal recomendada para optimizar vida útil del almacenamiento, presentada en porcentaje. Para las tecnologías CAES y PHS no se

hallaron publicaciones donde se mencionara este término, aunque por el principio de operación de estas tecnologías se estima que debe ser cercano al 100% para ambas.

Por otro lado los parámetros económicos, se dividen en costos de inversión y costos de operación y mantenimiento. Los costos de inversión se pueden dividir en tres conceptos: costo de inversión de energía, estos costos dependen principalmente del tipo de tecnología de almacenamiento (costos de materia prima, costos de construcción); costo de inversión de potencia, estos costos dependen principalmente de la electrónica de potencia (conversión corriente continua a corriente alterna) y tecnología de almacenamiento debido a la cantidad de materia prima usada en función de la densidad de potencia de la tecnología; y costo de inversión de planta que representa los costos de recinto, cableado, refrigeración, todo el equipamiento anexo al almacenamiento necesario para que el sistema de almacenamiento opere correctamente.

Tabla 2-2. Parámetros económicos de tecnologías de almacenamiento.

	Costo inv. Energía USD/kWh	Costo inv. potencia USD/kW	Costo inv. De plata USD/kW	Costo operación y mantenimiento USD/kW-año
CAES	10	450	160	6
PHS	12	2.000	16	3
Li-ion	1.500	1.500	100	10
Ni-Cd	1.197	600	100	15
Pb-acido	300	450	100	10
Na-s	534	3.000	100	14
Celda de hidrogeno	600	2.800	200	8

Donde:

- Costo inversión energía: representa el costo de inversión por unidad de energía nominal, en dólares por kilowatt-hora, de la instalación de almacenamiento.
- Costo inversión potencia: representa el costo de inversión por unidad de potencia nominal, en dólares por kilowatt, de la instalación de almacenamiento.
- Costo inversión planta: representa el costo de inversión de planta por unidad de energía o potencia dependiendo de la tecnología, de la instalación de almacenamiento.
- Costo de operación y mantenimiento: presentado en dólares por kilowatt-año, es el costo anualizado de operación y mantenimiento para un año de operación.

## 3 Freno regenerativo

El aprovechamiento de los recursos energéticos es uno de los temas de mayor actualidad y al cual dedican mayores inversiones desde el punto de vista de la investigación y el desarrollo. Sobre el ahorro energético se puede investigar en diferentes sectores del entorno industrial donde se lleve a cabo el consumo de cualquier tipo de energía, en todos ellos con una importancia demostrada, ya que convencionalmente además del ahorro económico también reporta importantes beneficios desde el punto de vista del medio ambiente.

### 3.1 Principio de funcionamiento de la maquina de inducción

Se entiende por máquina eléctrica todo aquel dispositivo capaz de transformar, en energía eléctrica, otra forma cualquiera de energía, o bien, al revés, transformar en otra forma de energía la energía eléctrica. De acuerdo con esto, se pueden clasificar las máquinas eléctricas en cintas transportadoras categorías que se muestran en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Categorías de máquinas eléctricas

Maquina	Función
Generador	Transforma cualquier tipo de energía en energía eléctrica.
Receptor	Transforma energía eléctrica en otra forma de energía si esta es mecánica, se denomina motor.
Convertidor	Transforma energía eléctrica, con unas determinadas características en energía eléctrica de otras características.

Las cintas transportadoras usan una máquina asíncrona. Una de las características de esta máquina es que puede ser usada como motor, cuando esta necesita traccionar, o como generador, cuando está frenando.

Desde el punto de vista mecánico y, relativo a la figura 3-1, se pueden distinguir, en la máquina, dos partes principales:

- Parte fija o estator.
- Parte móvil o rotor. (Por lo general, girará en el interior del estator).

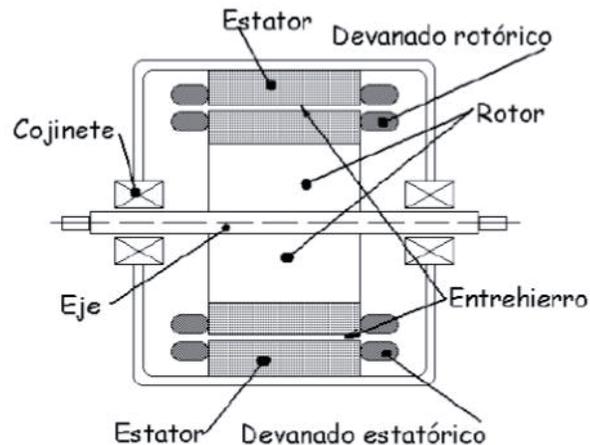


Figura 3-1. Constitución de una máquina eléctrica rotativa

Cada una de las partes abarca un núcleo toroidal cilíndrico de chapa magnética o fundición, cuyas superficies enfrentadas pueden ser casi continuas, con pequeñas ranuras repartidas uniformemente sobre su periferia (rotor o estator liso) o con amplias muescas, formando un conjunto de polos salientes. El pequeño intervalo de aire que queda entre ambas partes recibe el nombre de entrehierro.

Desde el punto de vista electromagnético, se encuentra siempre un circuito magnético, formado por los núcleos y el entrehierro y dos circuitos eléctricos.

Uno de estos dos circuitos eléctricos recibe el nombre de inductor, circuito de excitación o, simplemente, excitación y su función es producir el campo magnético de acoplamiento.

El otro circuito eléctrico, el inducido, es aquél donde se producen las fuerzas electromotrices, o sea, tensiones, que se recogen en el exterior de la máquina, como origen de la energía eléctrica cedida por la misma en su funcionamiento como generador o bien fuerzas contraelectromotrices, que se oponen a la tensión de alimentación en su funcionamiento como motor.

Asimismo, este circuito constituye el origen de un par motor, si la máquina opera de este modo o un par resistente, si la máquina opera como generador.

Lo que define si una máquina de inducción se encuentra trabajando como motor o como generador es la velocidad de funcionamiento del rotor, o lo que es igual, si el rotor gira a menor o mayor velocidad que el campo magnético inductor. Hay que decir que las máquinas eléctricas su funcionamiento está sujeto a la creación y funcionamiento del campo magnético, y que en el caso de las máquinas eléctricas, este campo magnético gira dentro de la máquina a una determinada

velocidad. La expresión que relaciona la energía eléctrica con el campo magnético que hace funcionar a la máquina eléctrica es la expresión 3-1.

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (3-1)$$

Donde:

$n_s$ : Velocidad a la que gira el campo magnético o velocidad de sincronismo, con esta expresión, la velocidad de giro viene expresada en revoluciones por minutos, siendo estas unidades las que frecuentemente se encuentra en las maquinas rotativas.

$f$ : Frecuencia de la red eléctrica a la que se encuentra conectada la maquina eléctrica.

$p$ : Número de pares de polos con los que se ha diseñado la maquina eléctrica.

El número de pares de polos, es una característica constructiva de los devanados internos de la máquina, este parámetro permite adecuar un determinado número de velocidades fijas de funcionamiento del campo magnético.

Por lo tanto, si el rotor de la máquina eléctrica gira a menor velocidad que el campo, se dice que este rotor e encuentra arrastrado por el campo magnético y está funcionando como motor.

Si por el contrario, la velocidad del rotor es mayor que la velocidad del campo magnético, entonces por el eje de la máquina se le está aportando una energía, que la maquina se encarga en transformarla en energía eléctrica.

La justificación de este hecho es relativamente simple y se trata de realizar un sencillo balance de potencias, en el que se tiene que igualar las potencias del conjunto, y que se ajusta a la expresión 3-2.

$$P_{electricas} = P_{mecanicas} + P_{perdidas} \quad (3-2)$$

Las pérdidas se detraen siempre de la potencia mayor de las dos antes anunciadas (mecánica o eléctrica), por otro lado estas potencias se ajustan según las expresiones 3-3 y 3-4.

$$P_{electricas} = V_{linea} \cdot I_{linea} \quad (3-3)$$

$$P_{mecanicas} = T_{mecanico} \cdot \Omega \quad (3-4)$$

Siendo  $\Omega$  la velocidad de giro del eje de la máquina. Por lo que, hasta una determinada velocidad el eje gira por debajo de la velocidad del campo, pero si se le aplica un par mecánico al eje que haga superar la velocidad de giro, entonces la potencia mecánica supera a la eléctrica y cambia el sentido de circulación de la corriente o lo que es lo mismo, se pasa de demandar potencia eléctrica de la red a suministrar.

En el análisis de la maquinas eléctricas de inducción, se demuestra que estas máquinas se les puede caracterizar su funcionamiento mediante una curva de par- velocidad como muestra la figura 3-2.

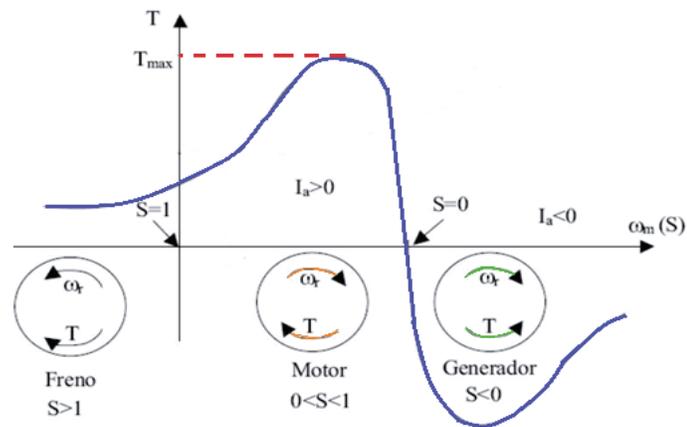


Figura 3-2. Curva par – velocidad de una máquina de inducción.

Una vez determinado, de forma sencilla el comportamiento de la máquina de inducción, y sus posibles puntos de trabajo, se puede estimar si está consumiendo o generando energía.

### 3.2 Principio de funcionamiento del motor asíncrono alimentado por convertidores de frecuencia.

El modelado del motor tipo jaula, es más complicado debido a que solamente hay acceso al motor desde el estator. De manera que se utilizará el método de variación de la velocidad de giro variando la frecuencia de las corrientes de alimentación del estator.

Teniendo en cuenta la ecuación del par, observamos que un descenso del flujo da lugar una reducción del par:

$$T = K \cdot \phi \cdot i_R \quad (3-5)$$

Por lo tanto, el aprovechamiento máximo del motor asíncrono implica controlarlo, de modo que el flujo se aproxime lo más posible al nominal, es decir, aquél para el cual la máquina ha sido diseñada y construida.

La primera manera de lograr, de forma aproximada, que el flujo no varíe es hacer que la tensión de alimentación y la frecuencia varíen proporcionalmente. Sin embargo, a medida que las frecuencias van bajando, en realidad los flujos disminuyen también.

Esta variación en la frecuencia de alimentación se debe a la acción del convertidor de frecuencia o ondulator que, partiendo de una red de corriente continua, proporciona corriente en alterna,

con frecuencia ajustable. El ondulator modifica la corriente continua, que toma de la red de alimentación, en magnitudes regulables de alterna para el motor.

### 3.3 Tipos de frenado

El sistema de los trenes incorporan un primer freno eléctrico para conseguir que el motor en el momento de freno actúe como generador, bien devolviendo la energía a la red o bien mediante el consumo de esa energía sobre resistencias que disipen el 100% de la energía en forma de calor. El sistema de frenado puede ser de dos tipos para una cinta transportadora de mineral:

- Frenado reostático.
- Frenado regenerativo.

#### 3.3.1 Frenado reostático

El frenado reostático se trata de un tipo de frenado dinámico en el que la misión de las resistencias de frenado es la conversión de la energía cinética generada por el motor de tracción, en energía calorífica por el efecto Joule, para el caso de que la catenaria no sea receptiva y no se pueda devolver esta energía a la red para su aprovechamiento. También se activan en caso de sobre tensiones en el circuito intermedio del convertidor de tracción.

Estas resistencias poseen resistencia variable y un elevado tamaño que las permite una disipación efectiva de la energía calorífica, además de un aprovechamiento de dicha energía en ciertas estaciones del año, como en el invierno, donde las resistencias pueden funcionar como fuentes de calor para el sistema de calefacción, pero a las que no se las puede dar otra aplicación en un ámbito diferente al del calentamiento.

Por otro lado, dicho sistema cuenta con unos choppers de frenado que son los encargados de habilitar y controlar la disipación de la energía cinética de la unidad en la fase de frenado.

Cada cofre de tracción incorpora dos circuitos de crowbar de protección contra sobrevoltajes, disponiendo de uno por cada Inversor Trifásico. Cada circuito de crowbar está constituido por un IGBT, un diodo y las resistencias de disipación externa.

Cada rama de chopper de frenado se conecta a cada resistencia de frenado, lugar donde como ya se nombró anteriormente, se absorbe la energía cinética de la cinta y las sobretensiones generadas.

#### 3.3.2 Frenado regenerativo

El sistema de frenado regenerativo se basa en la transformación de la energía cinética, a partir de su inercia, en energía eléctrica para abastecer por ejemplo, los sistemas auxiliares de un tren como son las comunicaciones, la calefacción o iluminación, etc.

Otro ejemplo para este tipo de frenado, es la implementación de frenos regenerativos en automóviles, donde se aprovecha la energía liberada por el sistema, en el momento de la

desaceleración, convirtiéndola en energía eléctrica. Con esta importante aplicación, el freno regenerativo produce menos desgaste, recarga las baterías, reduce la acumulación de calor en el motor y mejora la autonomía confiable.

El frenado regenerativo es el sistema de frenado en el que se centra este proyecto, por lo que en apartados posteriores se llevara a cabo un estudio más exhaustivo del mismo, particularizándolo para el caso de una cinta transportadora de mineral, considerándolo como un sistema de ahorro de energía para una planta.

### 3.4 Principio de funcionamiento del sistema de frenado regenerativo

Los frenos regenerativos permiten aprovechar la energía disipada en forma de calor al frenar. La energía que anteriormente se perdía en forma de calor se reconduce a un sistema que la transforma en energía eléctrica, que puede ser inyectarla directamente al sistema eléctrico de la planta.

Los frenos regenerativos se basan en el principio de que un motor eléctrico puede utilizarse como generador eléctrico. El motor eléctrico de tracción se reconecta como generador durante el frenado y las terminales de alimentación se convierten en suministradoras de energía la cual se conduce hacia una carga eléctrica; es esta carga la que provee el efecto de frenado.

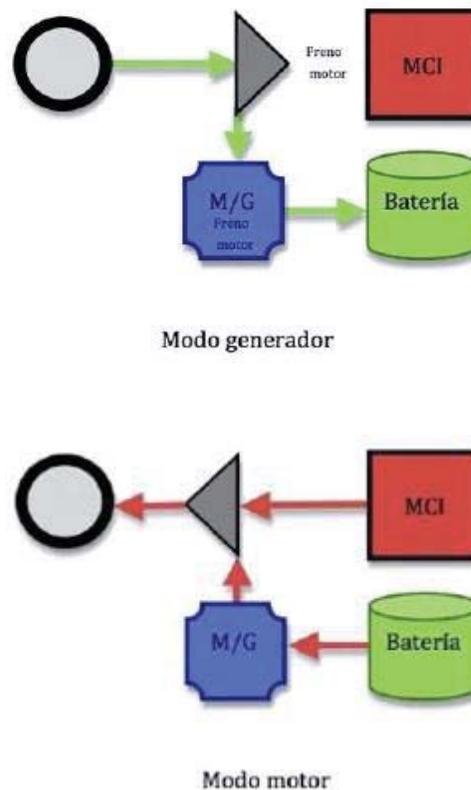


Figura 3-3. Principio de funcionamiento de frenos regenerativos.

### 3.5 El frenado regenerativo como ahorro de energía

El frenado regenerativo en cintas transportadoras de minerales, permite devolver energía a la red, con lo que se puede reducir notablemente el consumo energético de la planta. Sin embargo, en los sistemas electrificados en corriente continua (CC) se pueden dar situaciones en las que no se aproveche todo el potencial del frenado regenerativo. A continuación se exponen tres alternativas para mejorar la eficiencia y reducir costos de producción.

#### 3.5.1 Método A: Variadores regenerativos

Los variadores de velocidad proporcionan la velocidad exacta y un control del torque dinámico a los motores de la banda transportadora. Ambos motores están acoplados mecánicamente al transportador y por lo tanto requieren girar a la misma velocidad.

Con un variador regenerativo, la energía de frenado se aprovecha como energía activa entregada a la red eléctrica de la planta, ya que durante el ciclo de frenado, el motor y la banda se comportan como un generador eléctrico de potencia activa. El equipo dispone de un contador de energía (kWh) para el registro de datos necesarios en auditorías energéticas (ISO50001). Estos variadores ofrecen un arranque y parada suave controlado de los motores, minimizando el estiramiento y ruptura de la correa, asegurando un tiempo mayor de operación.

#### 3.5.2 Método B: Sistema regenerativo MultiDrive

Un sistema regenerativo MultiDrive es una aplicación polimotórica con bus de corriente continua compartida. Este bus también se conoce como Bus de CC. El cual se puede utilizar para controlar el funcionamiento del transportador en descenso y cualquier otra máquina o transportadores en el proceso (ver B1 en figura 3-4).

Los dos motores de las transportadorasuestas abajo están conectados mecánicamente a la banda, por lo que ambos motores necesitan girar a la misma velocidad y a un torque idéntico.

La energía de frenado de ambos motores alimenta el bus CC. Como los motores de las transportadoras de descenso y los motores de otras máquinas están conectadas al bus de CC común, esto permite el flujo de energía de frenado de los motores de la banda a los otros motores, tales como los mostrados en la figura 3-4-B2.

#### 3.5.3 Método C: Choppers de frenado y resistencias

Si la cantidad de consumo de energía no es importante, la operación de una banda transportadora de descenso se puede controlar, mediante un variador estándar con rectificador pasivo, basado en diodos o tiristores en lugar de las unidades de suministro de regeneración mencionadas anteriormente. La energía de frenado se disipa con la ayuda de choppers de frenado y resistencias de frenado (ver figura 3-4-C).

La figura 3-4 muestra los métodos descritos anteriormente para el ahorro de energía por medio de freno regenerativo.

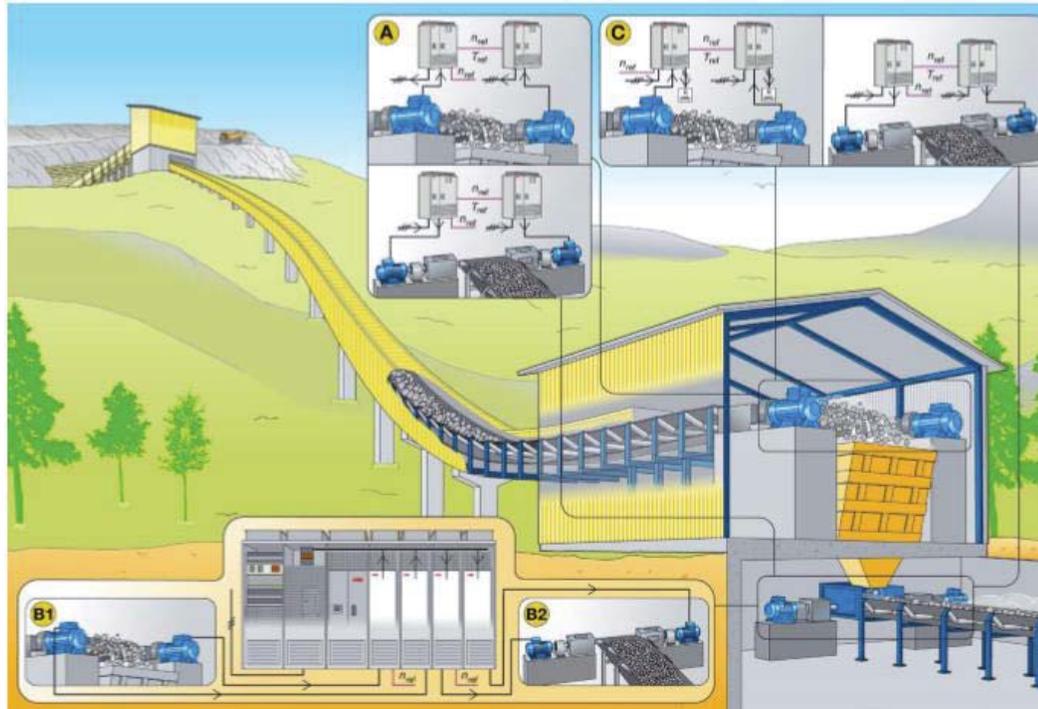


Figura 3-4. Métodos de ahorro de energía con freno regenerativo.

### 3.6 Variadores de velocidad

Un regulador electrónico de velocidad está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable. Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con una frecuencia y una tensión regulables, que dependerán de los valores de consigna. A esta segunda etapa también se le suele llamar ondulator. Todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de inversor.

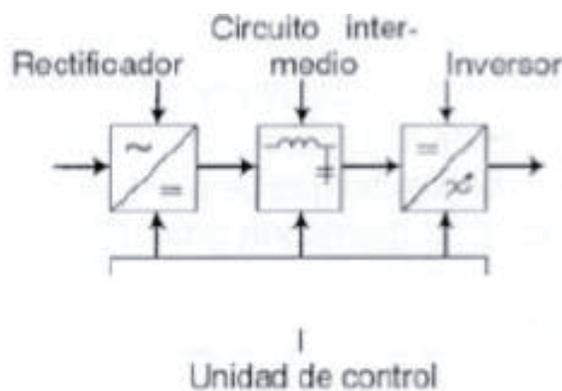


Ilustración 3-5. Variador de frecuencia

El modo de trabajo puede ser manual o automático, según las necesidades del proceso, dada la enorme flexibilidad que ofrecen los reguladores de velocidad, permitiendo hallar soluciones para obtener puntos de trabajo óptimos en todo tipo de procesos, pudiendo ser manejados por ordenador, PLC, señales digitales o de forma manual.

La mayoría de las marcas incluyen dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobreintensidad, sobretensión, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra, etc., además de ofrecer procesos de arranque y frenados suaves mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que redundará en un aumento de la vida del motor y las instalaciones.

Como debe saberse, el uso de convertidores de frecuencia añade un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones. Además aportan los siguientes beneficios:

- Consumo mínimo de energía.
- Costos de mantenimiento reducidos y vida útil prolongada de la banda transportadora, a través de un arranque y parada suave.
- Reducción de costos de energía o equipos de compensación reactiva debido al factor de potencia unitario de los variadores regenerativos.
- Minimización de corrientes armónicas a través de unidades de alimentación activas basados en IGBT. Velocidad exacta y regulación de torque dinámico a través de la plataforma de control del motor.
- Menos desgaste a través de la distribución equitativa de la carga entre los motores y la eliminación de los efectos dinámicos indeseables.
- Fácil conexión a la planta.

### **3.7 Alternativas de uso de la energía regenerada**

La energía generada puede tener las siguientes aplicaciones:

#### **3.7.1 Para servicios auxiliares**

En los casos en que la energía recuperada sea igual o inferior a la demandada por los servicios auxiliares, ésta se destinara a cubrir esa demanda.

Se entienden por servicios auxiliares a todos aquellos consumos que no están relacionados con la tracción, como puede ser la iluminación, dispositivos de protección, alimentación de equipos electrónicos, etc.

#### **3.7.2 Para uso en otros elementos del sistema.**

Si la cantidad de energía que se está regenerando es superior a la demandada por los servicios auxiliares, antes de acumularla o devolverla a la red, para evitar pérdidas es preferible que ésta sea absorbida por otros elementos del sistema externo, como pueden ser dispositivos de la infraestructura (mantenimiento, equipos de comunicaciones, etc.)

### **3.7.3 Retorno a la Red de alimentación de la planta.**

Si la energía recuperada supera a la demandada por los servicios auxiliares y otros elementos de la infraestructura, y el sistema no dispone de dispositivos de acumulación, existen dos posibilidades. La energía excedente se disipa en unas resistencias o es devuelta a la Red Eléctrica de abastecimiento. Obviamente la segunda opción es la más adecuada en términos de eficiencia energética.

### **3.7.4 Almacenamiento**

En algunas situaciones puede resultar más útil acumular parte de la energía regenerada para un uso posterior. En función del lugar en que se encuentren los acumuladores.

### **3.7.5 Almacenamiento y retorno a la Red.**

En caso de que sea posible tanto la acumulación y como la devolución a la red, se optará por una u otra alternativa en función de las necesidades concretas en cada momento y del precio de venta de la energía en ese período horario.

## **3.8 Situación actual en Chile**

La mina Los Pelambres, a 45 Km al norte de Salamanca, en la provincia de Choapa, fue descubierta en los años 20 por Wiliam Bradem, uno de los padres de la minería del cobre Chilena. Actualmente es la quinta mina de cobre más grande del mundo. Equipada con tecnología Siemens, la cinta en descenso más avanzada del mundo transporta mineral de cobre de la mina Los Pelambres, a 3.200 m sobre el nivel del mar, hasta la planta de concentración, situada 1.900 m. La cinta está diseñada para mover un máximo de 8.700 t/h de materia a granel y transporta mineral de cobre en una banda de 1,8 m de ancho a una velocidad de 6 m/s.

En el corazón de los accionamientos de la cinta hay 10 motores trifásicos de jaula de ardilla con una potencia nominal de 2,5 MW cada uno, alimentados por convertidores Siemens de media tensión. Una innovadora solución de control en lazo cerrado y accionamiento basada en productos de automatización Siemens garantiza un funcionamiento suave permanente de la cinta.

La tecnología GTO y Active Front End (AFE), combinada con Chopper, permite mantener los tramos de la cinta bajo control y comunicación garantiza la seguridad de la cinta en todos los modos de operación.

Gracias a la utilización de un moderno sistema de accionamiento, el transporte de mineral de cobre desde la mina hasta el concentrador permite generar 19 MW de energía eléctrica, que se devuelve a la red eléctrica de la planta. Esto reduce los costos de producción del concentrado de cobre.

## 4 Aplicaciones

Las aplicaciones se centran primeramente en los sistemas de almacenamiento de energía donde se busca optimizar el tamaño del sistema de almacenamiento asociado a un parque eólico conectado al SIC, en términos de energía y potencia. Para este fin se requiere una tecnología con alta capacidad energética y bajo costo por energía para evitar altos costos de inversión.

Se evalúan cinco alternativas de almacenamiento de energía implementadas en los parques eólicos Canela I y II ubicado en la en IV región de Coquimbo a 80 Km al norte de la ciudad de Los Vilos. Tiene una capacidad instalada de 78,15 MW con una generación media anual entre 47.140 - 202.974 MWh.

A 600 m de los parques eólicos Canela I y II se encuentra la sub estación donde se conecta al SIC. Si se dispone del lugar en línea recta se puede implementar el SAE en el punto medio correspondiente a 300 m del parque eólico y a 300 m de la sub estación para conectar al SIC.

Por otra parte, un sistema de recuperación de energía consiste en la aplicación de frenos regenerativos a una cinta transportadora de mineral ubicada en Codelco división Teniente, donde se priorice la cantidad de energía regenerada.

### 4.1 Aplicación de los sistemas de almacenamiento

El esquema de operación de los SAE está diseñado tal que se priorice la energía descargada. Sus principales características son las siguientes:

- Durante cualquier periodo, el exceso de energía eólica (diferencia positiva entre la salida del parque eólico y la salida deseada para ese instante) es desviado al almacenamiento. Se asume que el SAE tiene la habilidad de almacenar la cantidad de energía, considerando su eficiencia de carga, sujeto a sus límites respectivos de potencia y energía.
- Durante cualquier periodo donde haya déficit de energía (i.e. la diferencia negativa entre la salida del parque eólico y la salida deseada para ese instante), la energía almacenada en el SAE es descargada, enfocada a compensar el déficit. Si la energía disponible en el SAE es insuficiente para este propósito, toda la energía almacenada es descargada para compensar lo más posible el déficit. El déficit restante es compensado por los generadores restantes del sistema. La eficiencia de descarga de la unidad es considerada.

- En otras palabras, el SAE maximiza la energía descargada acumulando y redespachando la energía eólica cuando haya una oportunidad. Los múltiples ciclos de carga/descarga del SAE pueden ser precisamente programados porque se asume que la información (salida histórica del parque eólico, referencia de carga/descarga) es conocida con 100% de certeza.

#### 4.1.1 Análisis de almacenamiento de energía en pila de combustible

Se desea obtener una potencia de 40 MWh a una presión constante de 300 bar.

De acuerdo a las características técnicas de la pila de combustible, con un volumen de  $0,220 \text{ m}^3$  de hidrógeno y un caudal de  $330 \text{ cm}^3/\text{s}$ , se producen 3,72 KWh.

Dada la ecuación 4-1 se obtiene el volumen necesario de hidrógeno  $V = 2.366 \text{ m}^3$  para cumplir los requerimientos de energía.

$$V = \frac{40 \text{ MWh} \cdot 0,220 \text{ m}^3}{3,72 \text{ KWh}} = 2.366 \text{ m}^3 \quad (4-1)$$

El tiempo en que se generan los 40 MWh es aproximadamente de 2 horas y se obtiene a partir de la ecuación 4-2.

$$V = Q \cdot t \quad (4-2)$$

Donde:

V: Volumen de hidrógeno,

Q: Caudal de la pila

$t$  : Tiempo en que se produce energía eléctrica.

#### 4.1.2 Análisis de almacenamiento energía por bombeo de agua

La tabla 4-1 muestra los datos empleados en el proyecto.

Tabla 4-1. Características generales del almacenamiento por bombeo

Parámetro	Dato
Desnivel entre depósitos	100 m
Potencia nominal	20 MW
Densidad del agua	$997 \text{ Kg}/\text{m}^3$

Rendimiento de turbinas hidráulicas	0,9
Rendimiento del generador eléctrico	0,95
Rendimiento mecánico del acoplamiento turbina alternador	0,97
Tiempo de carga	6 hr
Tiempo de descarga	4 hr

Dada la ecuación 4-3 se obtiene el caudal de turbinación  $Q = 26,66 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$P_e = \rho \cdot 9,81 \cdot n_t \cdot n_g \cdot n_m \cdot Q \cdot H \quad (4-3)$$

$P_e$  : Potencia de la central.

$\rho$  : Densidad del agua.

$n_t$  : Rendimiento de la turbina hidráulica (entre 0,75 y 0,94)

$n_g$  : Rendimiento del generador eléctrico (entre 0,92 y 0,97)

$n_m$  : Rendimiento mecánico del acoplamiento turbina alternador (entre 0,95 y 0,99)

$Q$  : Caudal turbinable.

$H$  : Desnivel entre depósitos.

Para un tiempo de carga de 6 hr se obtiene la capacidad de los depósitos de agua

$V_{almacenamiento} = 355.104 \text{ m}^3$  a partir de ecuación 4-3.

$$V_{almacenamiento} = Q_{almacenamiento} \cdot t_{almacenamiento} \quad (4-4)$$

$$V_{descarga} = Q_{descarga} \cdot t_{descarga} \quad (4-5)$$

Donde:

$V_{almacenamiento}$  : Volumen de almacenamiento.

$Q_{almacenamiento}$  : Caudal de bombeo.

$t_{almacenamiento}$  : Tiempo de bombeo.

$Q_{descarga}$  : Caudal turbinable.

Dado un caudal de bombeo de  $16,44 \text{ m}^3/\text{s}$  se obtiene el tiempo de descarga  $t = 4 \text{ hr}$  a partir de la ecuación 4-4.

Finalmente se obtiene una energía de 80 MWh en 4 horas.

### 4.1.3 Análisis de almacenamiento de energía por aire comprimido

Para este método de almacenamiento se tiene una potencia nominal de 20 MW

La tabla 4-2 muestra los parámetros más relevantes para llevar a cabo el proyecto.

Tabla 4-2. Características generales del almacenamiento por aire comprimido

Parámetro	Dato
Potencia nominal	20 MW
Caudal de turbinación	$18,76 \text{ m}^3/\text{s}$
Tiempo de carga	6 hr
Tiempo de descarga	4 hr
Rendimiento del sistema de recuperación	0,83
Rendimiento del sistema de compresión	0,94

Dada la ecuación 4-4 se tiene el volumen de la caverna  $V = 270.144 \text{ m}^3$  necesario para obtener una potencia de salida  $P = 15,61 \text{ MW}$  en 4 horas, resultando una energía total de  $E = 62,42 \text{ MWh}$ .

### 4.1.4 Análisis de almacenamiento de energía en BESS

La tecnología seleccionada corresponde a baterías de ion litio. Esta tecnología se selecciona por su menor costo por energía, alta eficiencia, alta capacidad de profundidad de descarga, sin efecto memoria, elevada vida útil y demostrada madurez tecnológica en proyectos de gran envergadura enfocados en desplazamiento de carga en parques eólicos.

Un sistema de almacenamiento de energía de baterías electroquímicas se compone de módulos independientes, los cuales se conectan en arreglos serie-paralelo con tal de obtener valores de tensión, energía y potencia deseados.

Considerando los datos de la tabla 4-3, se explica el esquema de operación de carga y descarga del sistema BESS.

Tabla 4-3. Datos principales del BESS

Parámetro	Dato
Tiempo de descarga	15 min
$n$	0,95
DOD	0,8
$P_{nominal}$	24 MW

Donde:

- DOD: límite de profundidad de la batería.
- $n$  : rendimiento del SAE.

Las ecuaciones 4-6 y 4-7 definen la cantidad de energía neta almacenable y la energía neta descargable del SAE.

$$E_{cargable} = \frac{E_{nominal} \cdot DOD}{n} [MWh] \quad (4-6)$$

$$E_{descargable} = E_{nominal} \cdot DOD \cdot n [MWh] \quad (4-7)$$

Dados los datos de la tabla 4-3 y las ecuaciones anteriormente descritas se tiene:

$$E_{cargable} = 5,05 MWh \quad (4-8)$$

$$E_{descargable} = 4,56 MWh \quad (4-9)$$

Finalmente, en un tiempo de 15 min. se obtiene una potencia de 18,24 MW.

### Análisis económico.

La tecnología que se eligió para el análisis económico es un BESS de ion litio. El desarrollo de esta tecnología aumenta cada vez más a medida que pasa el tiempo, por lo que su precio tenderá a disminuir, y además por sus características técnicas. Las descargas internas son bajas, del orden del 0,1 a 0,3% por día, su eficiencia en los ciclos de descarga es bastante alta, de entre un 90 y un 100%, y permite más de 10.000 ciclos de carga y descarga lo que hace que su vida útil sea muy elevada.

Analizando a grandes rasgos, la ganancia que puede otorgar la implementación de un sistema BESS asociado a un parque eólico, considérese una generación anual del parque eólico de  $P = 47.140$  [MWh], con un factor de planta  $f_p = 30\%$ , un precio de energía de  $p_E = 1.500$  [USD/KWh] y que el sistema BESS permite aumentar la generación en un porcentaje de  $a = 4,2\%$  [%], la ganancia anual asociada correspondería a:

$$Ganancia_{anual}[USD] = P \cdot f_p \cdot p_E \cdot a \cdot 24 \cdot 365 \quad (4-10)$$

Dada la ecuación 4-2 y una tasa de interés anual de 7,9%, se tiene una ganancia anual de  $Ganancia_{anual}[USD] = 7.804.687$

Para analizar si el proyecto es factible se procede al cálculo del VAN definido en la ecuación 4-11.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_o \quad (4-11)$$

Donde:

$V_t$ : Representa los flujos de caja en cada periodo t.

$I_o$ : Valor del desembolso inicial de la inversión.

n: Número de períodos considerado.

K: Tipo de interés.

Tabla 4-4. Características económicas de un BESS

	Costo inv. Energía USD/kWh	Costo inv. potencia USD/kW	Costo inv. De plata USD/kW	Costo operación y mantenimiento USD/kW-año
Li-ion	1.500	1.500	100	10

Dados los datos de la tabla 4-4, se obtiene el valor de inversión inicial total de  $I_0 = 47.400.000$  USD. Considerando el costo de operación y mantenimiento anual en valor presente  $V_p = 682.423$  USD descrito por la ecuación 4-13, se tiene una inversión total de 48.082.423 USD.

$$V_p = \frac{A}{i} \left[ 1 - \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (4-12)$$

Donde:

$A$ : Valor de pago individual en cada periodo.

$i$ : Tasa de variación del dinero para cada periodo.

$n$ : Numero de periodos de pago.

Para los cálculos se considera una tasa de variación correspondiente al 12% y un horizonte de 15 años.

Finalmente dada la ecuación 4-12 se obtiene un  $VAN = 5.074.243$  USD. Considerando que este valor es mayor que cero, el proyecto es aceptable.

### Aplicación de BESS en Chile

En Chile existen dos sistemas tipo BESS instalados en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), en base a baterías de ion-litio. Ambos sistemas están diseñados para dar apoyo a las centrales térmicas Angamos y Norgener. El sistema BESS de la Central Angamos es de 20 MW, y el sistema BESS de la Central Norgener es de 12 MW.

#### BESS en Central Angamos

Para el proyecto BESS de la Central Angamos, en operación desde Diciembre del 2011, se desarrolló una solución de almacenamiento de energía de 20 MW/5 MWh, para realizar funciones de reserva en giro para el soporte de la red. La unidad de almacenamiento monitorea constantemente la condición del sistema y responde inmediatamente con hasta 20 MW a cualquier oscilación de frecuencia significativa (por ejemplo, la pérdida de un generador o de una línea de transmisión). El sistema provee de una respuesta suficiente de potencia inmediata para ayudar a mantener la red hasta que se despeje la falla o se puedan despachar otros recursos.

Como en el CDEC-SING se obliga a que un 7% de la potencia máxima de las centrales sirvan para proveer reserva en giro, con este proyecto AES Gener pudo aumentar su generación en esta planta, ya que sus obligaciones de reserva en giro las cubre con la planta de almacenamiento de energía. Según reportes se confirma que la unidad provee de una rápida respuesta y es una de las más confiables unidades para las contingencias de la red.

#### BESS en Central Norgener

El proyecto BESS de 12 MW para la Central Norgener, el cual se encuentra en operación desde Noviembre de 2009, se construyó en la Subestación Andes, por no existir espacio físico cercano central. La solución provee 12 MW/4MWh y se puede operar ya sea vía despacho del sistema o con un modo autónomo respondiendo directamente ante cambios significativos de frecuencia, de acuerdo a los límites fijados por el operador (CDEC-SING). De igual forma, este proyecto

permite a AES Gener generar mayor potencia con sus centrales, debido a que el BESS libera la reserva en giro obligatoria que la central posee. De igual forma, los reportes del CDEC-SING indican que el sistema provee de una respuesta rápida y confiable ante contingencias en el sistema. Este sistema permitió la implementación del BESS en la Central Angamos. El proyecto tuvo una inversión de US\$ 22 millones y tiene un VAN de varios millones de dólares. Dentro de las ventajas que posee, se encuentra la disminución de los costos operacionales del sistema, mejora la seguridad del Sistema durante contingencias, reduce los costos de mantenimiento de la central, y mejora la eficiencia del generador, pues el generador estará operando cerca de su potencia nominal.

## 4.2 Freno regenerativo en cintas transportadoras

Las cintas transportadoras normalmente utilizan motor de inducción rotor devanado. Históricamente han sido utilizados para partir cargas de alta inercia o que exijan torques de partida elevados cuando el sistema de accionamiento requiere partidas suaves.

Para la implementación de frenos regenerativos es necesario cambiar el motor de inducción con rotor devanado por un motor de inducción con rotor tipo jaula de ardilla. Este tipo de motor es el más ampliamente utilizado para accionamiento de bombas, ventiladores, compresores, etc. Entre sus principales ventajas se incluyen su inherente simplicidad de construcción del rotor y controles; su bajo costo y, obviamente, su adaptabilidad a ambientes más agresivos.

Este motor presenta menores pérdidas, se pueden aplicar ajustes más finos de torque y velocidad y también limita el flujo de potencia reactiva.

La figura 4-1 muestra el reemplazo de motor de inducción con rotor devanado por el motor de inducción con jaula de ardilla.



Figura 4-1. Reemplazo de motor de inducción con rotor devanado por motor jaula de ardilla

### 4.2.1 Cintas transportadoras

Las cintas transportadoras aumentan la seguridad y la eficiencia de su sistema de transporte de materiales. Cuando se usan cintas transportadoras para mover mineral, es necesario que proporcionen la máxima precisión, fiabilidad y las mejores prestaciones para que el negocio siga avanzando.

Los frenos regenerativo para cintas transportadoras de mineral son un real aporte para la minería, ya que gracias a este sistema se puede aprovechar la energía de los frenados de la cinta incorporándola a la red eléctrica de la planta, lo que disminuye los costos de producción.

Los sistemas de cintas transportadoras se emplean cuando los materiales deben ser desplazados en cantidades relativamente grandes entre posiciones específicas de un rutado fijo. La mayoría de estos sistemas son impulsados mecánicamente; algunos emplean la gravedad para trasladar la carga entre puntos de diferente altura.

Estos sistemas tienen los siguientes atributos:

- Son generalmente mecanizados y a veces automatizados.
- Ocupan posiciones fijas, estableciendo las rutas.
- Pueden estar montados sobre el suelo o suspendidos del techo.
- Casi siempre están limitados a un flujo unidireccional de materiales.
- Generalmente mueven cargas discretas, aunque algunos están preparados para cargas voluminosas o continuas.
- Pueden emplearse sólo para transporte o para transporte más almacenamiento automático de elementos.

### 4.2.2 Transportadoras de descenso

El flujo continuo de materia prima es muy importante en la elaboración y tratamiento de minerales. Las materias primas se transportan principalmente utilizando diversas bandas transportadoras, que se componen de algunos elementos como: Motores, variadores de velocidad, chumaceras, reductores, correas, etc.

Los transportadores de descenso se utilizan para el transporte de mineral, piedra caliza y otros materiales, partiendo del depósito en altas colinas, es por eso que se necesita un frenado continuo de la banda transportadora cuesta abajo, que evite el movimiento excesivo de la correa y su materia prima.

El nivel de frenado requerido varía dependiendo de la cantidad de materia prima transportada. Este control de frenado evita el desgaste innecesario de la banda transportadora y requiere un arranque y parada suave controlada, así como características regenerativas en los elementos eléctricos utilizados.

La figura 4-2 muestra una cinta transportadora de mineral en descenso.



Figura 4-2. Cinta transportadora en descenso.

### 4.2.3 Cálculo de la energía regenerada

Codelco división Teniente, utilizan una cinta transportadora para el traslado de mineral cobre desde una planta a otra. La cinta transportadora es movida por un motor de inducción de rotor devanado, el cual es necesario cambiarlo por un motor de inducción de rotor jaula de ardilla como se describió anteriormente. La potencia consumida por la cinta para realizar el proceso completo es de 178 KW en una hora.

La tabla 4-5 muestra las características generales de la cinta.

Tabla 4-5. Características generales de la cinta

Variables	Datos
Capacidad	1000 TPH
Largo	323 m
Ancho	1,22 m
Velocidad	0,09 m/s
Desnivel	21,8 m

De acuerdo a la información recopilada se aprecia que es una cinta transportadora en descenso. Normalmente estas infraestructuras son curvas, lo que, para efecto de cálculo, se aproxima a la hipotenusa caracterizada por el triángulo rectángulo de la figura 4-3.

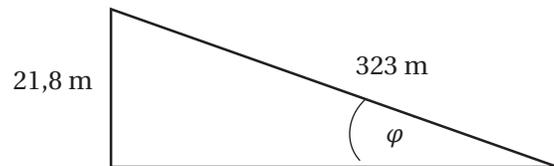


Figura 4-3. Aproximación de la cinta transportadora

Donde el ángulo que forma la cinta transportadora con el piso es  $\varphi = 15^\circ$ .

El dato que interesa es la energía regenerada descrita en la ecuación 4-13.

$$E = P \cdot \Delta t \quad (4-13)$$

Donde:

E: Energía.

P: Potencia.

$\Delta t$ : Incremento de tiempo.

La potencia es proporcional a la fuerza y a la velocidad como se muestra en la ecuación 4-14.

$$P[KW] = F[KN] \cdot v[m/s] \quad (4-14)$$

Donde:

P: Potencia regenerada.

F: Trabajo realizado por unidad de tiempo.

$v$ : Velocidad de la cinta transportadora.

Dado que la cinta transportadora es en descenso, el frenado se produce continuamente para lo que se utiliza valor promedio para la fuerza de  $F = 435 \text{ KN}$ , siendo la potencia  $P = 39,15 \text{ KW}$ .

De esta forma la potencia regenerada es de  $P = 39,15 \text{ KW}$  en 1 hora, correspondiente al 21,99% de la energía total consumida en el proceso.

## 5 Discusiones y conclusiones

Los módulos de almacenamiento de energía han resultado ser muy útiles para la solución de problemas existentes en los sistemas eléctricos. Existen diversos tipos de tecnologías, según la energía que almacenan para poder generar energía eléctrica, cada uno de los sistemas de almacenamiento tiene sus ventajas y desventajas que deben ser consideradas según la aplicación que se quiera realizar. La variedad tecnológica permite que existan soluciones validadas y de amplio uso en el mercado junto con alternativas que potencialmente podrían tener mucho futuro.

La gran variedad de características técnicas permite que estos equipos sean utilizados para una gran variedad de aplicaciones dentro de los distintos sectores de un sistema eléctrico. Se ha visto que estos equipos se pueden usar para controlar la frecuencia o tensión de los sistemas, ayudar a descongestionar las líneas de transmisión hasta aplazar inversiones, incluso generar grandes cantidades de energía, utilizando la capacidad de almacenamiento, para poder aprovechar los excesos de energía en cierto punto para poder utilizarlos cuando hay déficit de ésta.

En el mundo, la mayor cantidad de capacidad instalada de sistemas de almacenamiento de energía corresponde a las unidades de bombeo hidroeléctrico, sobre todo en países desarrollados. Los sistemas de almacenamiento en baterías han ido aumentando su inclusión en el mercado con el avance de las tecnologías, por ejemplo, de las baterías de ion-litio.

En Chile existen equipos en funcionamiento basados en baterías ion-litio, siendo el caso de dos instalaciones en el SING. Este antecedente sirve como motivación para realizar estudios que puedan expandir el uso de estos equipos en el SIC, cuyo inconveniente principal radica en lo que indica la normativa vigente con respecto a su uso. En particular, la nueva normativa referente a los Servicios Complementarios (actualmente en discusión) no es clara al respecto del uso de estos equipos, siendo los CDEC los organismos encargados de estudiar e informar si el sistema requiere la instalación de éstos, aun cuando podrían mejorar y hacer que la operación del sistema en estudio sea más eficiente.

Los sistemas de almacenamiento en batería pueden solucionar problemas en el SIC, como por ejemplo para el control de frecuencia, pero para el impacto económico que genera la inclusión

de proyectos ERNC en el sistema podrían ser mejor otras alternativas. Además, para un mejor entendimiento técnico del uso de estos equipos se requiere de un estudio dinámico que permita evaluar cómo funcionan estos equipos (como su carga y descarga) ante las variaciones de la generación de las fuentes renovables.

Por lo tanto, como trabajo futuro se propone lo siguiente:

- Profundizar en el estudio de los sistemas de almacenamiento de energía para estudiar el comportamiento dinámico de estos equipos para los casos de estudio evaluados en el presente trabajo.
- Se propone modelar de manera más detallada la generación de los parques eólicos y plantas fotovoltaicas que entrarán a operación en el futuro, utilizando información real de las condiciones de los recursos energéticos de la zona en que se ubicarán y modelos que permitan predecir de mejor manera la generación futura de estas centrales. Además se propone realizar estudios con los proyectos que se han confirmado posterior al Informe Técnico Definitivo de Abril 2014.
- Se propone modelar las tasas de tomas de carga y los tiempos de partida de las centrales carboneras para estudiar su efecto en la operación del sistema que podría influir en la magnitud del vertimiento eólico. Para evaluar el impacto de estas características debería compararse para una “generación base de ERNC” para que la variación de esta no influya en el estudio.

En el caso de las cintas transportadoras de mineral, la incorporación de sistemas de recuperación de energía parece ser una medida factible de optimizar el consumo. Cada día está tomando más importancia el ahorro energético, por motivos económicos y medio ambientales.

Por supuesto, existen ciertas complicaciones técnicas derivadas de la regeneración, como puede ser la gestión y control de esa energía que se está generando y la inversión necesaria para adaptar el sistema de tracción.

Además puede darse el caso de que aparezcan “picos” de generación en los que la red eléctrica es incapaz de absorber toda la energía que se está regenerando.

Para solucionar los problemas anteriormente citados, puede resultar conveniente incorporar dispositivos de acumulación de energía que ayuden a mejorar la estabilidad y robustez del sistema.

Indudablemente, desde el punto de vista de la eficiencia energética es más apropiado devolver a la Red la energía regenerada que almacenarla, ya que el rendimiento asociado a los distintos procesos que se derivan de la acumulación de energía obviamente difiere de la unidad.

Para poder devolver energía eléctrica a la red, un requisito indispensable es que las subestaciones de alimentación sean reversibles. En el caso de las subestaciones de corriente alterna no existen impedimentos importantes para su reversibilidad, pero en la de corriente continua, el puente de diodos rectificador que incorporan implica que sea necesario añadir a la instalación un equipo

inversor de una potencia determinada, que conecte la catenaria con el secundario del transformador, en paralelo con el rectificador.

Uno de los principales factores que determinan el potencial de recuperación de energía de una cinta transportadora es el lado de esta. Cuanto menor sea la distancia recorrida, el nivel de aprovechamiento será mayor.

Los cambios de nivel y las pendientes negativas pronunciadas también afectan de manera positiva a la cantidad de energía recuperable en un trayecto.

Si en algún tramo del recorrido se supera la pendiente equivalente (a partir de la cual, el sumatorio de fuerzas acelerantes supera al de fuerzas de frenado) esto supondría que la cinta transportadora debe realizar un esfuerzo de frenado constante para evitar que el tren supere el límite de velocidad establecido, por lo tanto, a medida que, en un determinado trazado, el número de kilómetros con éstas características aumente, el porcentaje de energía recuperada con respecto a la consumida también irá en aumento y la incorporación de dispositivos de recuperación de energía en la cinta transportadora tendrá cada vez más sentido.

Para los proyectos analizados, es factible su implementación, en términos económicos, disminuyendo los costos de producción de la planta utilizando al máximo los recursos disponibles. En términos ambientales también es favorable la implementación de estos sistemas, dado a los procesos implementados para obtener energía.

# Bibliografía

- [1] Ernesto Bianchi S., «Elementos de electroquímica: Electrólisis y acumuladores reversibles,» 2012.
- [2] G. Reed, R. Kerestes, B. Grainger y Z. Smith A. Sparacino, «Survey of Battery Energy Storage Systems and Modeling Techniques,» IEEE, 2012.
- [3] Ronny Muñoz M., «Almacenamiento de Energía: Modelos de Negocios y Ubicación Óptima,» 2013.
- [4] Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding Haisheng Chen, «Progress in electrical energy storage system: A critical review,» 2009.
- [5] A. Mohamed, M. A. Hannan M. Z. Daud, «A review of the integration of Energy Storage Systems (ESS) for utility grid support,» 2012.
- [6] L. E. Benitez, P. C. Benitez y Cornelis van Kooten, «The economics of wind power with energy storage,» Energy Economics, n° 30, pp. 1973-1989, 2008.
- [7] P. Fernández Díez, «Energía Eólica,» Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2002.
- [8] Centro de Energías Renovables, «Resumen Anual 2012,» Santiago, 2013.
- [9] Emilio Andrea Blanco, «Cintas transportadoras,» Universidad de Cantabria, 2008.
- [10] Rishid Muhammad J., «Electrónica de Potencia,» México, Prentice Hall, 1995.

# A Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica

Los sistemas de almacenamiento se pueden ocupar a lo largo de todas las etapas del sector eléctrico. Las características mencionadas anteriormente pueden determinar que tipo de tecnología utilizar en las diversas aplicaciones que existen dentro del Sistema Eléctrico. A continuación se enumeran las aplicaciones que pueden cumplir los sistemas de almacenamiento:

## A.1 Generación

Las aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía que se pueden ocupar en generación son las siguientes:

### A.1.1 Regulación de frecuencia

Los equipos de almacenamiento pueden dar regulación primaria y secundaria de frecuencia en los sistemas interconectados. Para la regulación primaria, se absorbe potencia cuando hay un incremento de la frecuencia (se carga) y análogamente, se inyecta potencia cuando hay una bajada en el valor de frecuencia (se descarga).

Para el Control Primario de Frecuencia se requiere bastante rapidez, la respuesta del sistema de almacenamiento de energía debe ser de entre 3 a 5 segundos, hasta los 30 segundos, y luego debe ser capaz de proveer regulación hasta más o menos 15 minutos. Los tiempos de respuesta de 20 ms de algunos equipos de almacenamiento pueden significar mejoras en el desempeño de la regulación frecuencia contra el control convencional.

Una forma de prestar regulación primaria es instalando sistemas de almacenamiento en la red de transmisión o distribución de manera de inyectar o absorber potencia activa cuando el operador lo requiera. La segunda forma es incorporar sistemas de almacenamiento a centrales térmicas o hidráulicas de manera de prestar CPF con el sistema de almacenamiento y elevar el nivel de generación de la central, dado que los niveles de reserva en giro se verían reducidos. Esto permitiría ingresos mayores para el propietario de la central por venta de energía (y potencia). Esto sucede actualmente en el SING, en las Centrales Norgener y Angamos.

Otro nicho que se presenta es el caso de la energía solar y eólica, ya que estos son prácticamente incapaces de dar regulación primaria, salvo cierto margen de reserva que puedan tener a través del pitch control en el caso de las eólicas o regulando el punto de operación fuera del óptimo en el caso de las plantas fotovoltaicas, por lo que con el apoyo de sistemas de almacenamiento puede significar una oportunidad de negocio para ayudar a la penetración de energías alternativas.

Con sistemas de almacenamiento se puede dar regulación secundaria cuando el Control Secundario de Frecuencia se realice de forma manual o automática.

### **A.1.2 Arbitraje de energía**

Debido a la forma en que se hace el despacho económico en los Sistemas Interconectados chilenos y la variación horaria de la demanda, se presentan curvas de demanda que el mercado debe equilibrar económicamente, lo que hace variar los costos marginales del sistema, siendo mayores en alta demanda y disminuyendo cuando la demanda baja.

Con este escenario, los sistemas de almacenamiento pueden gestionar la compra y venta de energía, de modo de puede comprar energía a bajos precios (se carga) y vendiendo a altos precios (descarga). Para lograr esto se requieren sistemas de almacenamiento con largos números de ciclos (se requiere descargar y cargar constantemente) y que en lo posible sean de gran tamaño.

### **A.1.3 Apoyo a renovables no convencionales**

Las energías renovables no convencionales cada vez van aumentando su competitividad pero a su vez poseen deficiencias técnicas que impiden su penetración en los sistemas. Por ejemplo, la variabilidad de la disponibilidad de los recursos renovables no convencionales (por ejemplo, el viento) implica que existen variaciones de potencia muy fuertes, lo que genera oscilaciones de frecuencia en el área de inyección. El uso de sistemas de almacenamiento permite suavizar las curvas de potencias en parques eólicos, ayudando a nivelar estas fluctuaciones.

La intermitencia del recurso provoca también que no se pueda controlar cuando se despacha, y puede que existan peaks de generación que se den cuando los costos marginales son bajos, y cuando son altos no se puede generar. Con el apoyo de los sistemas de almacenamiento, se puede cargar cuando existe en el sistema una demanda baja, y descargar cuando se encuentra en horas de alta demanda, lo que puede mejorar el desempeño del parque eólico, reflejado en su perfil de potencia, lo que tiene un mayor control sobre su despacho económico.

En algunas ocasiones, los sistemas de transmisión que permiten transportar la energía desde los parques eólicos están diseñados con límites de transmisión menores a la potencia máxima del parque por razones económicas. Esto provoca que una determinada cantidad de potencia no se puede transmitir cuando se activa la restricción de la línea, lo que produce pérdidas para el propietario del parque. Esto se conoce como vertimiento eólico. Con equipos de almacenamiento de energía, se carga el equipo cuando el límite se activa, con la energía que no se puede inyectar, y luego se gestiona la inyección mediante la descarga cuando ya no exista restricción del límite de

transmisión. En la Figura A-1 se puede observar gráficamente un ejemplo del fenómeno explicado anteriormente:

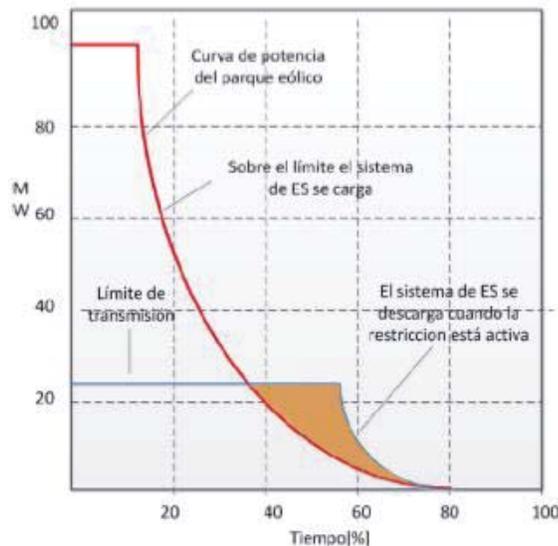


Ilustración A-1. Uso de sistemas de almacenamiento en parque eólico con límite de transmisión.

## A.2 Transmisión y Distribución

Las aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía que se pueden ocupar en transmisión y distribución son las siguientes:

### A.2.1 Regulación de tensión

De forma similar a la regulación de frecuencia, se debe tener la tensión en niveles dentro de una banda, lo cual se realiza a través de la inyección o absorción de potencia reactiva.

Para regular tensión con un sistema de almacenamiento de energía, debe actuar de manera rápida, con tiempos del orden de los 20 ms, para lo cual se utiliza un equipo conversor de potencia que permita al sistema operar en los cuatro cuadrantes, de modo que el sistema de almacenamiento pueda operar como capacitor o reactor, según se necesite, de acuerdo a los valores de tensión de la operación.

### A.2.2 Partida en negro o autónoma

La partida en negro es la capacidad que tiene una unidad para poder incorporarse al sistema eléctrico estando inicialmente apagada, sin la necesidad de la asistencia de la red eléctrica. Este tipo de capacidad se utiliza para energizar la red eléctrica y dar soporte para la conexión de otras unidades y líneas de transmisión para el caso de fallas totales o parciales de los sistemas.

Los sistemas de almacenamiento requieren de grandes niveles de potencia (10 MVA o más) para energizar las líneas de transmisión, brindar control de voltaje, frecuencia y lograr la partida de los

generadores. Además deben tener tiempos de descargas de algunas horas, para poder energizar los generadores y darles partidas desde un estado frío (por ejemplo en turbinas de gas desde 15 minutos a una hora).

### **A.2.3 Descongestión de líneas de transmisión**

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden permitir la descongestión de las líneas; se puede instalar un sistema de almacenamiento en el lado de la carga o el consumo, de manera que el sistema descargue su energía cuando la línea de transmisión esté al tope de su capacidad y de manera inversa, se cargue cuando la línea no esté al tope de su capacidad.

Dentro de los beneficios que genera esta aplicación, se encuentra la baja en los costos por la descongestión, lo que provoca que los costos marginales se reduzcan. Por otro lado existe un aplazamiento de las inversiones de expansión para la capacidad de la línea. Sin embargo, esta aplicación no se ha utilizado en sistemas de transmisión y distribución debido a que los sistemas de almacenamiento pasan a ser un activo de la red, sujeto a la aprobación por parte del operador.

### **A.2.4 Estabilidad angular de rotor**

En los SEP debe existir sincronismo entre los generadores del sistema. Cualquier perturbación de potencia activa dentro del sistema puede generar pérdida de sincronismo, lo que puede provocar apagones parciales o totales de no tomar acciones correctivas. Para controlar la estabilidad angular se pueden utilizar sistemas de almacenamiento ya sea absorbiendo o inyectando potencia con la frecuencia de la oscilación (0,5 a 1 Hz) por un periodo de unos 10 segundos o usar una reserva pronta para amortiguar las oscilaciones durante 10 segundos.

### **A.2.5 Estabilidad transitoria**

Las tecnologías de almacenamiento de energía pueden mejorar la robustez de la respuesta frente a fallas, reduciendo las posibilidades de que se generen escenarios de inestabilidad. En el lado de la carga donde ocurre la falla, se inyecta potencia acelerando esa área en particular, o de igual manera absorbiendo potencia en el lado de la generación desacelerando esa zona. Para realizar esto los sistemas de almacenamiento deben ser tecnologías muy rápidas, que garanticen una respuesta muy veloz (de unos pocos milisegundos) con una descarga de muy poco tiempo, pero el dispositivo debe esperar para ser usado por largos periodos, por lo que las pérdidas por descargas internas deben ser prácticamente nulas.

### **A.2.6 Aplazamiento de inversiones**

En subestaciones de distribución o del sistema de transmisión, los transformadores deben cumplir con el criterio técnico N-1, es decir, cuando uno de los transformadores está fuera de servicio el otro debe ser capaz de llevar toda la carga. Si la carga sobrepasa la capacidad máxima del transformador, se debe expandir la subestación añadiendo otro equipo. Esta solución, ineficiente desde el punto de vista económico, genera una oportunidad que puede ser solucionada con el uso de sistemas de almacenamiento de energía.

Una forma que permite seguir operando los transformadores durante un tiempo, consiste en colocar en el lado de distribución sistemas de almacenamiento que puedan inyectar energía durante los peaks de la demanda que eventualmente superarían la capacidad de los transformadores, de esta forma se aplaza la inversión de transformadores nuevos por algunos años y se podrían reutilizar los sistemas de almacenamiento en otra subestación que presente el mismo problema.

### A.2.7 Calidad de la Energía

En ciertas industrias los requerimientos relacionados con la calidad de la energía son cada vez mayores, principalmente por la sensibilidad de algunos equipos ante las variaciones que existen en los sistemas eléctricos, ya sea de frecuencia, tensión u otras variables. Existen fenómenos que aunque estén dentro de la normalidad con respecto a la normativa técnica, puedan afectar algunos equipos, por lo que se genera la oportunidad para el uso de sistemas de almacenamiento de energía que sean capaces de entregar una energía de calidad, con los requerimientos que estos equipos posean, durante algún tiempo.

### A.3 Uso de ESS en el Mundo

Con el aumento de la utilización de las energías renovables no convencionales en el mundo, en particular la integración a la red de fuentes eólicas y solares, se introducen problemas técnicos en la operación de la red, la que requiere la utilización de sistemas de almacenamiento de energías (ESS). Incluso, estos sistemas satisfacen de mejor manera el manejo de las energías extraídas de las fuentes renovables.

La cantidad de sistemas de almacenamiento de energía a nivel mundial se ilustra en la Figura A-2, donde se muestra que un 99% se trata de sistemas de PHS, luego vienen los sistemas de BESS, como NaS, plomo-ácido y NiCd.

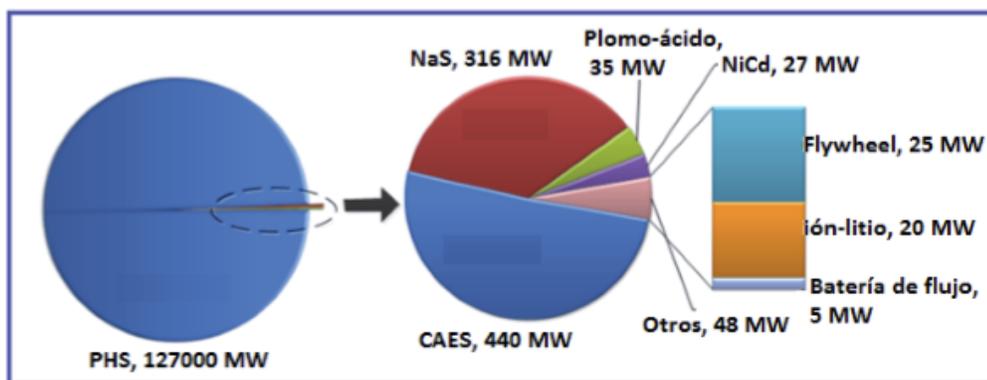


Ilustración A-2. Capacidad instalada en sistemas de almacenamiento

El rol de las ESS en los sistemas de potencia ha sido revisado por gran cantidad de investigadores, quienes han investigado sobre el estado del arte de las tecnologías de almacenamiento adecuadas para las aplicaciones de potencia y energía. El uso que se le puede dar a estos sistemas de almacenamiento se pueden dividir en tres categorías funcionales:

- Almacenamiento de gran escala para aplicaciones de energía.
- Almacenamiento de descarga rápida para aplicaciones de potencia.
- Sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS).

## A.4 Aplicaciones de los ESS en el SIC

Considerando las características técnicas y las aplicaciones de los equipos de almacenamiento de energía, en particular, las baterías (BESS), se pueden analizar diversos problemas que puedan existir en el Sistema Interconectado Central, de manera de presentar soluciones utilizando estos sistemas de almacenamiento. Para evaluar el funcionamiento de los sistemas de almacenamiento de energía se abordarán algunos escenarios presentes en el SIC, los cuales serán presentados y detallados a continuación:

### A.4.1 Control de Frecuencia “Desplazamiento de Reserva en Giro”

La necesidad de mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda eléctrica en todo momento, con el objeto de compensar los desbalances instantáneos producidos por la variación natural de los consumos o perturbaciones tales como la desconexión intempestiva de generación o consumos mayores, determina la necesidad de mantener en todo momento una cantidad de potencia de reserva en giro, denominada reserva primaria, destinada para efectuar la regulación primaria de frecuencia y de esta forma, restablecer el equilibrio entre la generación y la demanda eléctrica.

Existen dos tipos de reserva primaria, una de ellas destinada a atender las variaciones naturales instantáneas de la demanda y la otra, para restablecer el equilibrio generación-demanda provocada por la desconexión intempestiva de generación. La magnitud de la segunda reserva, pasa por equilibrar los menores costos de operación al reducir dicha reserva con respecto al aumento de los costos asociados a la energía no suministrada (ENS), debido a la desconexión de carga por baja frecuencia (EDAC) por déficit de generación (reserva en giro).

La repartición de las reservas de potencia de las unidades de generación es asignada en forma económica por la aplicación del modelo PLP, unidades de generación que se encuentran en la Tabla A-3.

Tabla A-1. Unidades contempladas para la reserva en giro para el CPF.

Central	Potencia máxima (MW)	Potencia mínima (MW)	Nº de unidades	Estatismo permanente (p.u)
Canutillar	170	40	2	0,047
Ralco	690	90	2	0,07

**A Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica**

Pangue	460	50	2	0,0215 y 0,0227
El toro	450	0	4	0,0278
Antuco	313	60	2	0,023 y 0,021
Cippreces	102	15	3	0,03
Pehuenche	560	120	2	0,025 y 0,03
Colbun	479	100	2	0,05
Machicura	95	0	2	0,05
Rapel	377	30	5	0,1; 0,09; 0,08; 0,1 y 0,09
Abanico	49	0	2	0,03
Pilmaiquen	39	0	5	0,04
Pullinque	49	0	3	0,04
Candelaria B1	122	60	1	0,04
Candelaria B2	125	60	1	0,04
Tal Tal 1	115	65	1	0,0395
Tal Tal 2	117	65	1	0,0392

En su mayoría, son centrales hidroeléctricas, a excepción de las centrales Candelaria y Tal-Tal. Cabe señalar, que las turbinas de gas de los ciclos combinados y otras unidades turbogas no contempladas en la lista anterior pueden eventualmente proveer reserva en giro. Sin embargo, en la práctica estas unidades de generación generalmente son despachadas a plena carga por mérito económico, con excepción de casos en que alguna de éstas sea despachada a mínimo técnico por seguridad operativa.

Se considera que la reserva total técnica y económica óptima para el CPF del SIC es de 231 MW, y la reserva en giro total requerida por el sistema es del orden de 367 MW. Esta reserva en giro total corresponde a la mínima reserva requerida para operar técnica y económicamente el sistema y considera el eventual desprendimiento de consumos por actuación de algunos escalones del EDAC.

Cabe señalar que, dadas las características propias de las centrales y la evolución diaria de la demanda, durante la mayor parte del tiempo la operación real del SIC ha presentado montos de reserva en giros superiores a la reserva mínima.

En el escenario indicado anteriormente, se propone un esquema mediante la utilización de equipos de almacenamiento en baterías para cubrir la reserva necesaria para el control de la frecuencia en el Sistema Interconectado Central. Esto se detalla en la Figura A-3. Se puede observar que los equipos BESS cubren parte de la reserva en giro para el CPF, las centrales térmicas siguen sin tener reserva en giro y pueden generar a plena carga, y las centrales hidroeléctricas pueden disminuir su reserva en giro para aumentar la cantidad de generación de estas centrales.

Los sistemas de almacenamiento en este escenario presentan las siguientes ventajas:

Reemplaza la reserva en giro que debe ser provista por centrales térmicas (que no están destinadas a proveer esta reserva, pues no lo pueden hacer de forma rápida y eficiente) Distribuye el control de la frecuencia a lo largo de la red, lo que mejora el rendimiento de la red cuando existen grandes contingencias, lo que sucede debido a la distribución física de las centrales que proveen de reserva en giro, y las congestiones que puedan existir a lo largo del sistema de transmisión. Tiene la capacidad de proveer partida autónoma (o partida en negro).

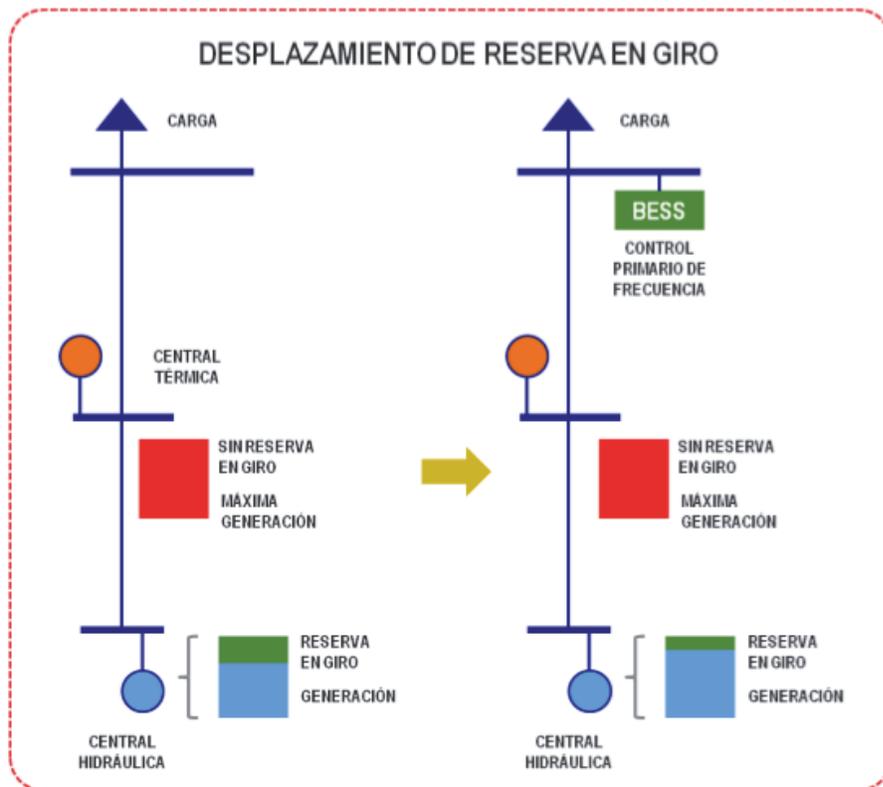


Ilustración A-3. Escenario de desplazamiento de reserva.

## B Componentes de un BESS

Un sistema de almacenamiento de energía en baterías está constituido por módulos de determinada potencia de banco de baterías, agrupados típicamente en contenedores. Además, contiene un sistema de conversión de potencia, encargado de convertir la energía entregada por las baterías en AC, o en DC cuando se requiera cargarlas. Finalmente, se tienen los sistemas de control asociados, ya sea al sistema de baterías o del convertor. Esta configuración se observa en la Figura B-1.

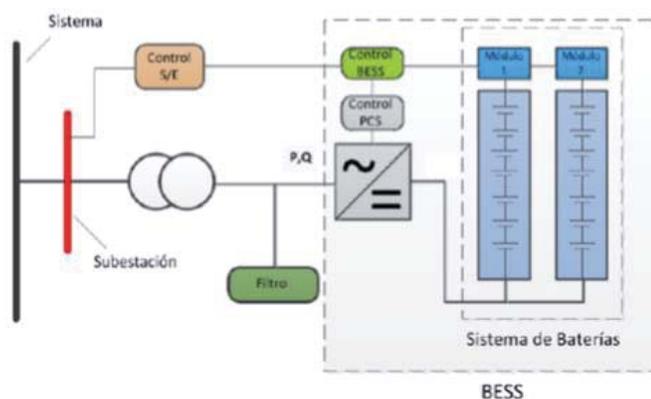


Figura B-1. Componentes de un BESS

También se deben considerar los equipos que se utilizan para contener el sistema de almacenamiento y que proveen de las conexiones eléctricas entre el sistema de conversión y la red eléctrica.

### B.1 Sistema de Conversión de Potencia (PCS)

Para los sistemas de conversión se utilizan las tecnologías de electrónica de potencia que han ido evolucionando en el último tiempo. Lo ideal es que el sistema BESS pueda operar dentro de los cuatro cuadrantes, lo que implica que pueda entregar o absorber potencia activa o reactiva, según su operación. Según el tipo de aplicaciones del sistema de almacenamiento de energía, se pueden imponer distintos tipos de demandas en los sistemas de conversión de potencia. Estas demandas se detallan a continuación y se resumen en la Tabla B-1:

Tabla B-1. Tabla resumen de los Tipos de Sistemas de Conversión de Potencia PCS.

Tipo	I	II	III	
Características del PCS	Nombre	Pronto continuo	Programado continuo	Pronto continuo
	Topología	Inversor de fuente de voltaje, control 4 cuadrantes.	Inversor de fuente de voltaje, control 4 cuadrantes.	Inversor de fuente de voltaje, control 4 cuadrantes.
	Interfaz ESS	Chopper opcional (conversor DC-DC)	Chopper opcional (conversor DC-DC)	Sin chopper
	Tecnología	GTO, IGCT, IGBT	GTO, IGCT, IGBT	IGBT bajo voltaje
Ciclos de trabajo	Tiempo de respuesta	<20 ms	<10 min	<20 ms
	Duración de descarga	Continuo en el rango de potencia	Continuo en el rango de potencia	<30 s en el rango, continuo en 1/Pf% del rango de potencia
Valores importantes	Eficiencia de la conversión	95% durante la carga y 95% durante la descarga	95% durante la carga y 95% durante la descarga	95% durante la carga y 95% durante la descarga
	Eficiencia stand-by	98%	100%	98%
	Regulación de reactivos	Continuo en todo el rango	No hay	Continuo en 1/Pf del rango

**PCS Tipo I, pronto continuo:** Este tipo de PCS se caracteriza por tener tiempos de respuestas bajo los 20 ms (un ciclo), y proveer un suministro continuo y un control de potencia activa y reactiva durante más de 30 segundos. Estos PCS se “mantienen en caliente” para que la potencia pueda entregarse a lo largo de un ciclo. Además, las pérdidas de energía para mantener el estado “preparado en caso de”, es de alrededor de un 2%. **PCS Tipo II, programado continuo:** Este tipo puede ser utilizado en aplicaciones que requieren de un suministro de potencia programado con notificaciones de al menos 10 minutos, que además requieren de control de potencia activa y reactiva durante el intervalo de la descarga. Estos equipos pueden estar apagados entre los intervalos de descarga programados, previniendo pérdidas en espera. **PCS Tipo III, pronto discontinuo:** Funcionan de modo similar al tipo I, con tiempos de respuesta de un ciclo, suministrando durante 30 segundos. Se introduce el término de “factor de pulso” ( ) como la razón de la corta duración del suministro continuo de potencia.