



SISTEMA INGEBER

Recuperación de la energía excedente en el frenado eléctrico en trenes alimentados con catenaria de corriente continua

Asier Ugarte

Director Comercial, INGETEAM Traction

2010/09/15

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un gran interés por el consumo sostenible de energía

En el mundo de la tracción eléctrica, existen dos campos de actuación:

- **Sistemas de tracción cada vez más eficientes.**
- **Aprovechamiento de la energía excedente de tracción.**

Esta presentación trata sobre este segundo punto.



Introducción a los sistemas de frenado de los trenes

Sistemas de frenado (I): Sistemas mecánicos

Los primeros sistemas de frenado fueron mecánicos, y se siguen utilizando como freno principal en unidades diesel - hidráulicas

Punto de vista de funcionamiento

- **Se basa en la fricción entre zapata y disco generando calor**

Punto de vista energético

- **La energía cinética se convierte en calor**
- **Esa energía en forma de calor se pierde**



Sistema de frenado (II): Freno reostático

Su utilización comenzó con la introducción de la tracción eléctrica

Punto de vista de funcionamiento

- **Se utilizan los motores eléctricos para el frenado del tren.**
- **Los motores actúan como generadores frenando las ruedas.**
- **La energía eléctrica se quema en resistencias embarcadas**

Punto de vista energético

- **La energía cinética se convierte en eléctrica.**
- **La energía eléctrica se convierte en calor.**



Sistemas de frenado (III): Sistema regenerativo

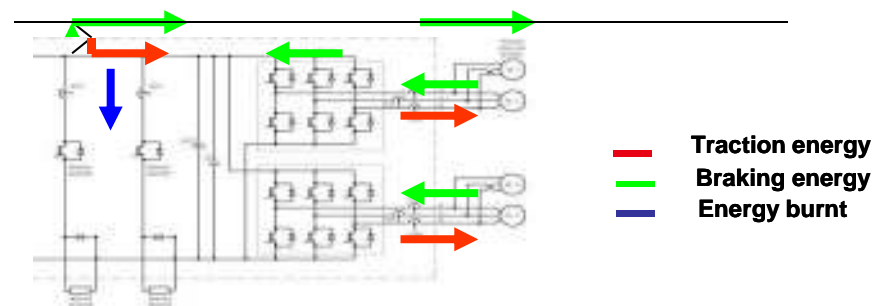
Su utilización comienza con la introducción de los semiconductores de potencia.

Punto de vista de funcionamiento:

- Se utilizan los motores eléctricos para el frenado del tren.
- Los motores actúan como generadores frenando las ruedas.
- La energía eléctrica se devuelve a la catenaria, *siempre que exista otro consumidor en ese momento en la catenaria.*

Punto de vista energético:

- La energía cinética se convierte en eléctrica, para poder ser aprovechada



Sistema de frenado (IV): Trenes eléctricos actuales.

La estrategia actual de los sistemas de frenado es la siguiente:

- Primeramente utilización del frenado regenerativo.
- Cuando no es posible, frenado reostático para evitar desgastes.
- Finalmente, freno mecánico, como medida de seguridad.



Operación de Metro

Operación de Metro (I): Características

Características principales de la operación de metro

- Los trenes tienen una masa elevada al llevar mucho pasaje.
- La distancia entre las estaciones es pequeña.
- La frecuencia es elevada, por lo que los trenes continuamente aceleran y frenan.



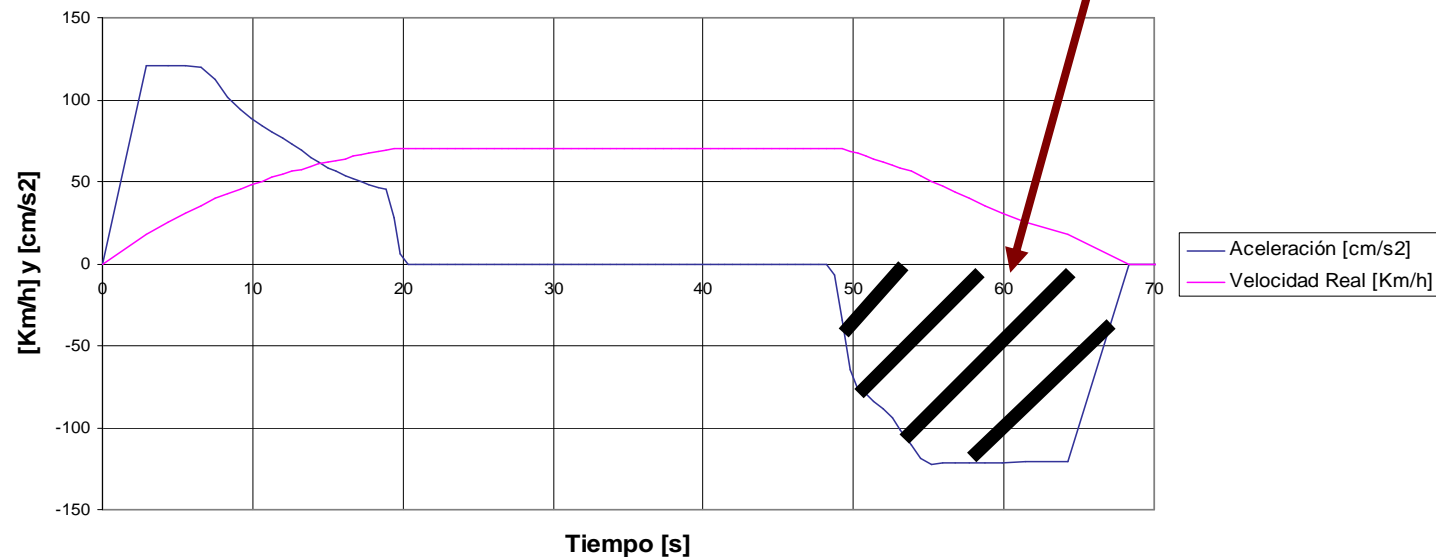
Operación de Metro (II): Frenado y Aceleración

Los metros no paran de acelerar y frenar:

¡¡ Hay mucha energía de freno que se puede perder !!

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Fuerza-Espacio
Arranque con rampa 0% y frenado con pendiente 0% en CCN

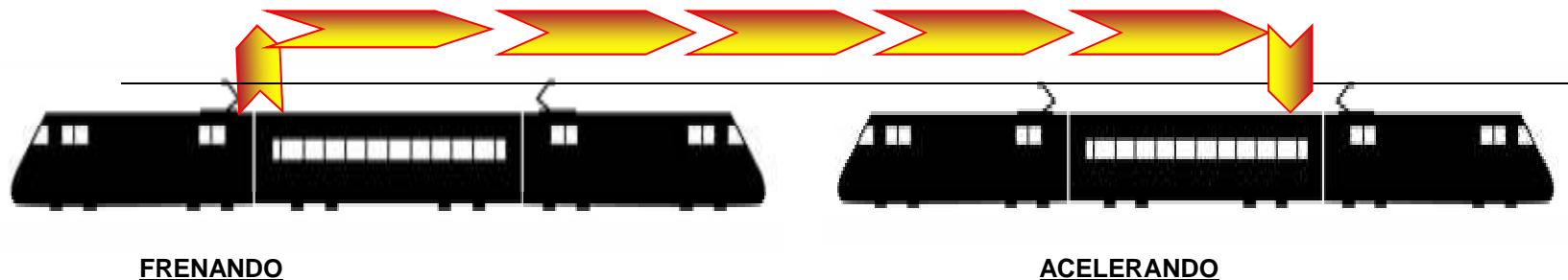


Operación de Metro (III): Sincronización

Para el reaprovechamiento de la energía, actualmente se implementa la sincronización de los trenes:

- Cuando un tren acelera, otro frena.
- De esta manera, la energía de frenado se reaprovecha.

Este es el sistema más eficiente de reaprovechamiento, pero la realidad es que es difícil superar el 40% de la energía recibida por los trenes, del orden del 20% queda sin aprovechar.

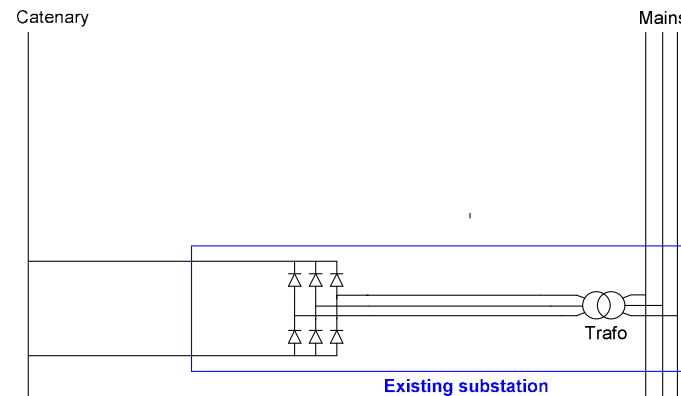


Operación de Metro (IV): Subestaciones unidireccionales

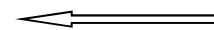
La mayor parte de los Metros operan en corriente continua.

Las subestaciones están dotadas de rectificadores unidireccionales.

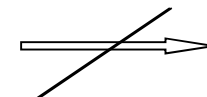
La energía proviene de la red, ¡pero no puede devolverse!



DC



AC



Operación de Metro (V): Consecuencia de la unidireccionalidad

Cuando las subestaciones son unidireccionales:

- **Los trenes frenan de manera regenerativa si otro tren puede aprovechar la energía.**
- **Si no hay otro tren, la tensión de catenaria sube.**
- **Cuando el tren ve una tensión elevada, quema la energía en las resistencias de freno.**

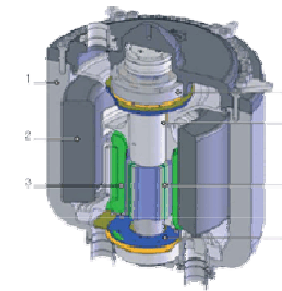


Distintas alternativas de mejora analizadas

Opciones de Mejora Analizadas (I)

Sistemas embarcados:

Ultracapacitores



Sistemas de Subestación:

Ultracapacitores

Volantes de Inercia (Fly wheel)

Sistemas de devolución a catenaria



Opciones de Mejora Analizadas (II): Ultracaps Embarcados

Los Ultrapacitadores son elementos entre los condensadores y las baterías:

- Pueden almacenar más energía que un condensador.
- Su tasa de transferencia de energía mayor que las baterías.

Utilización embarcada:

- Se instalan en el vehículo.
- Al frenar los trenes, se almacena la energía de frenada.

Inconvenientes:

- Son pesados y de precio elevado, inversión muy elevada solo para reaprovechamiento.
- Inversión solo justificable en tranvías con tramos sin catenaria.



Opciones de Mejora Analizadas (III): Ultracaps en Subestación

Ultracaps en Subestaciones:

Pueden instalarse en las subestaciones, para almacenar energía y posteriormente utilizarla para otros trenes.

Inconvenientes:

Son elementos pesados, de mucho espacio y precio elevado.

Se debe realizar un análisis del coste de la instalación y la energía reaprovechada, para encontrar el óptimo económico. No toda la energía puede reutilizarse.

Son elementos con una vida útil limitada, a mantener climatizados

Recomendada en caso de que la devolución a red interna o general no sea posible



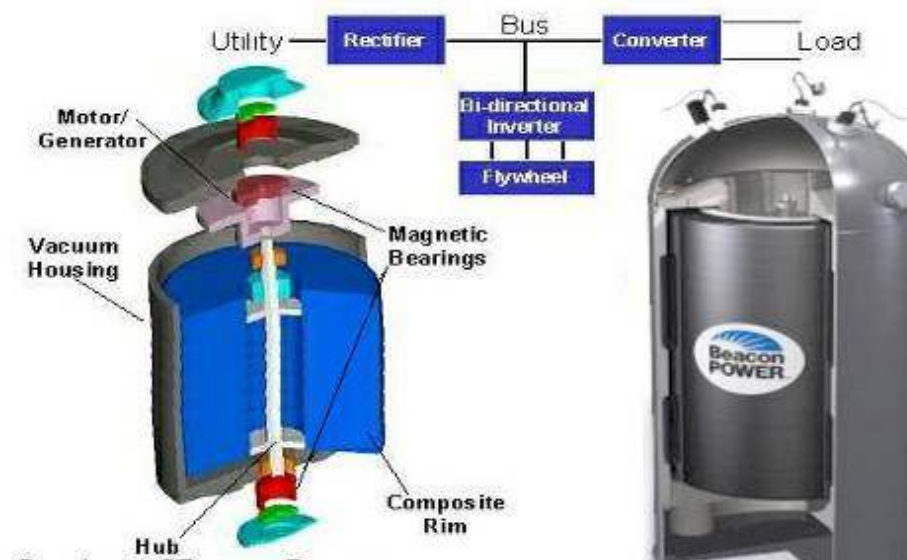
Opciones de Mejora Analizadas (IV): Fly-wheels

Los volantes de inercia o fly-wheels, convierten la energía eléctrica en mecánica, y la guardan en forma de movimiento para su posterior reutilización.

Inconvenientes:

Su eficiencia es inferior a otros sistemas.

Son elementos mecánicos complejos, y requieren de un espacio elevado y preparado de manera especial en la subestación por seguridad.



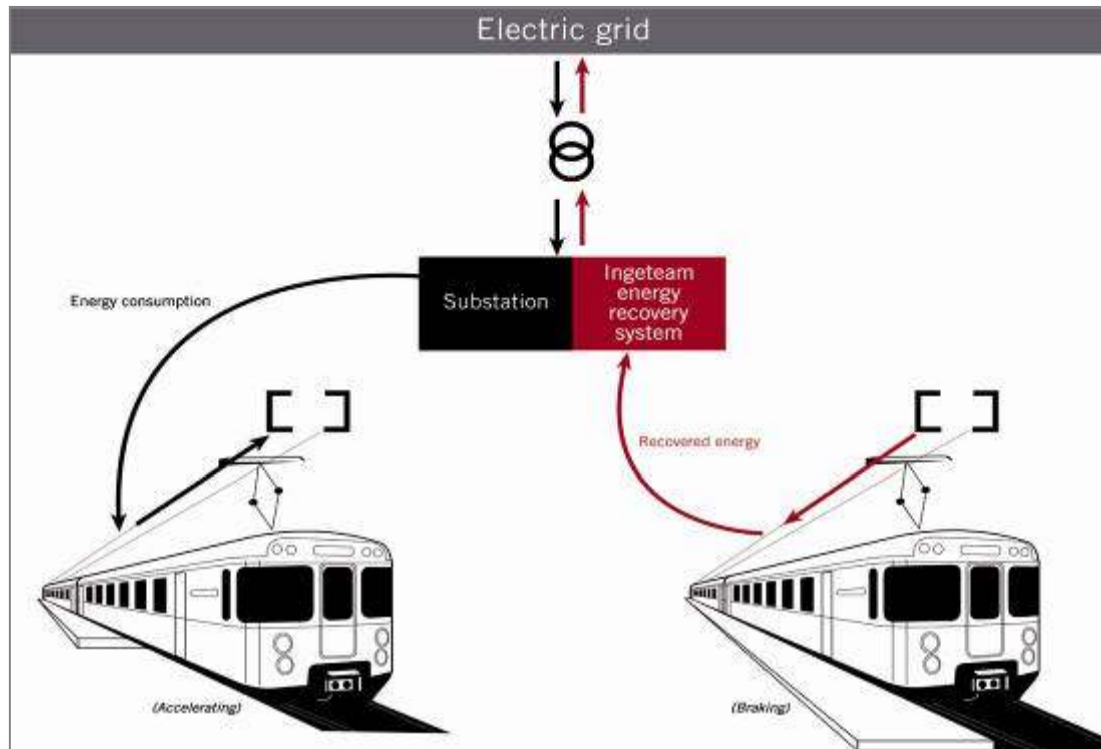
Opciones de Mejora Analizadas (V): Devolución a catenaria

- **Sistemas más simples con mayor fiabilidad.**
- **Capacidad de almacenamiento ilimitada (respecto a potencia de trenes)**
- **Menor inversión.**
- **Posibilidad de reutilización de energía o descuento de su coste si la legislación lo contempla**



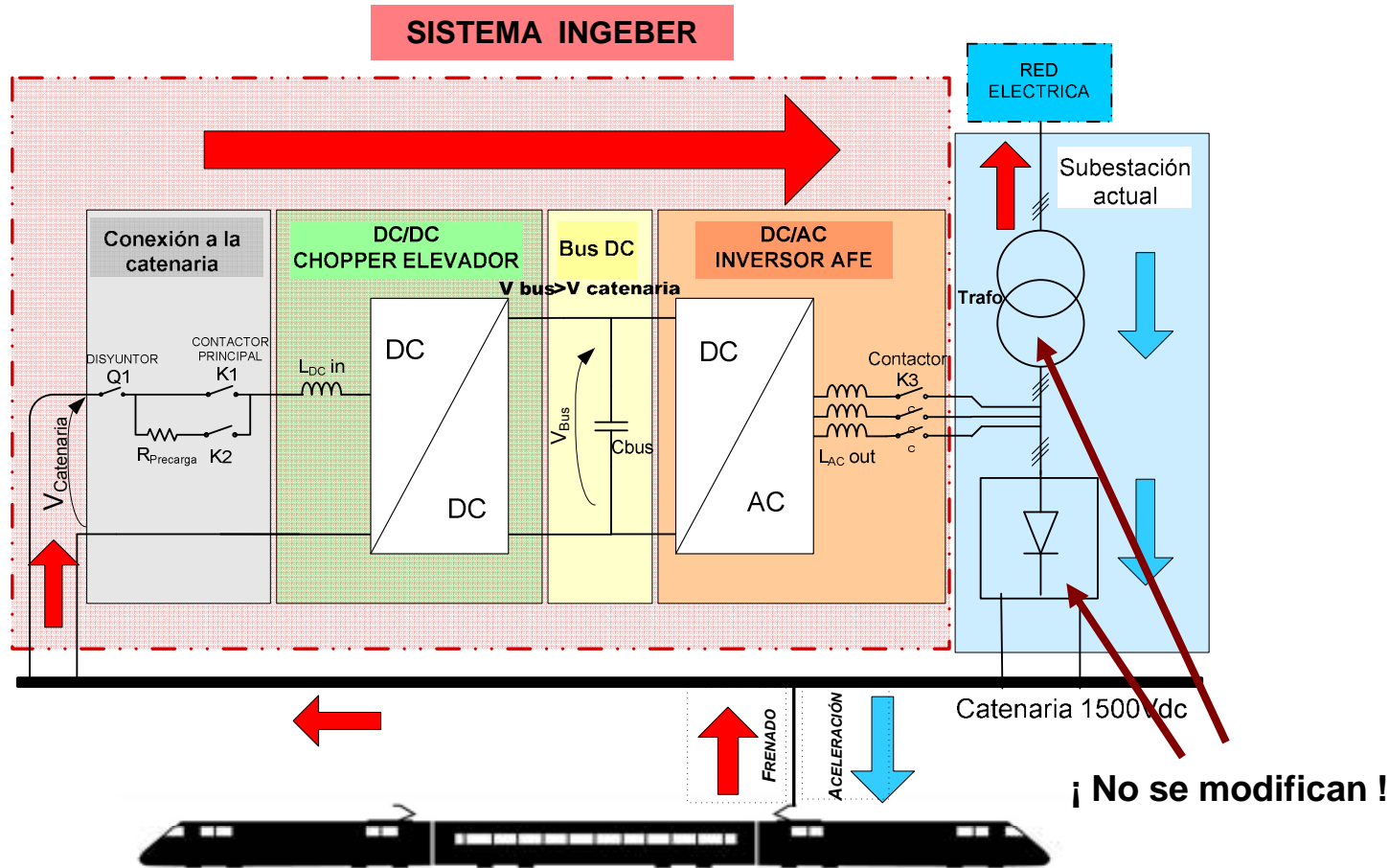
Sistema INGEBER: Introducción

Sistema Ingeber (I): ¿ Qué es ?



Sistema que permite la devolución del excedente de energía proveniente del frenado a la red eléctrica

Sistema Ingeber (II): ¿ Como funciona ?

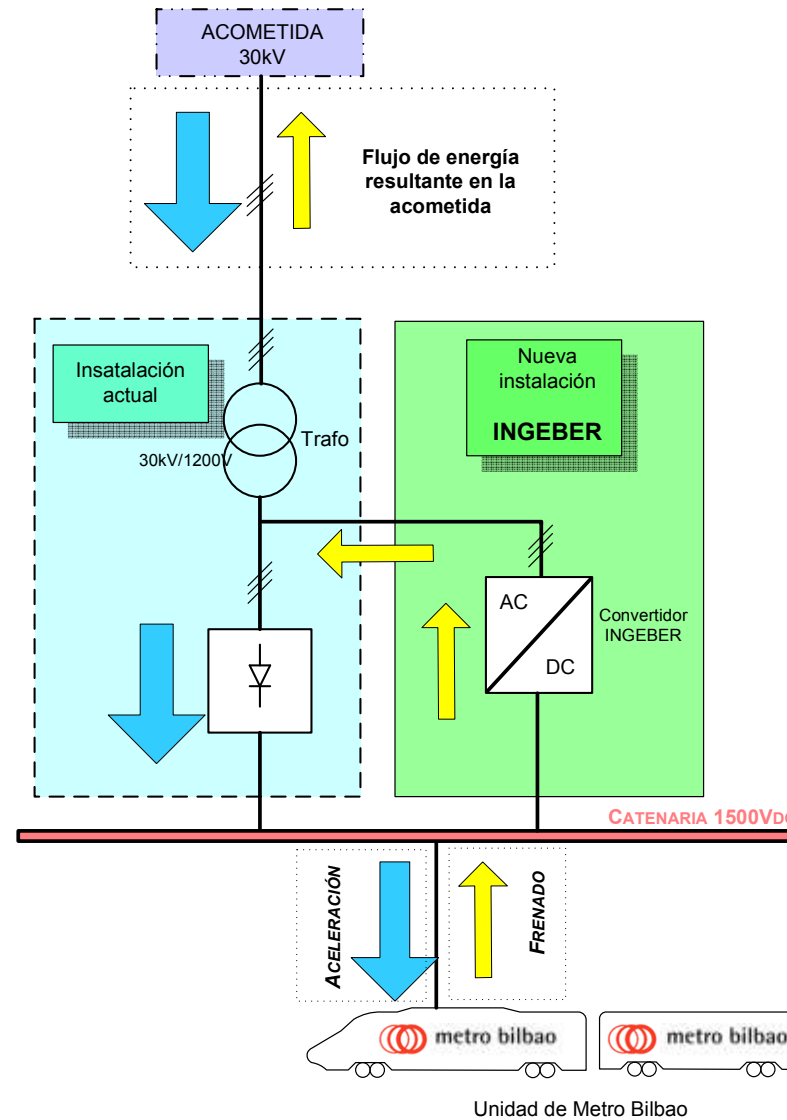


➤ Convierte las subestaciones en bidireccionales, manteniendo los elementos principales sin afectar su fiabilidad.

➤ Aprovecha la energía excedente devolviéndola a la red.

Sistema Ingeber (III): ¿ Como funciona ?

- Convertidor DC/AC entre catenaria y secundario del transformador.
- Conectado en paralelo con el rectificador.
- Se mantiene la infraestructura existente.
- Garantiza ratios de fiabilidad y disponibilidad de las subestaciones actuales.



Sistema Ingeber (IV): Ventajas

- ✓ No modifica la subestación existente, mantiene transformador y rectificador
- ✓ Su operación no interfiere en la instalación, pudiendo desconectarse de forma automática en caso necesario
- ✓ El sistema se dimensiona en función de la energía a ahorrar y no de la potencia instalada, por lo que la inversión es ajustada.
- ✓ La energía devuelta a red es de alta calidad (THD < 3%)

Sistema INGEBER: Fases de implementación

Fases Implementación Ingeber (I): Introducción

Cada Sistema ferroviario cuenta con unas condiciones específicas

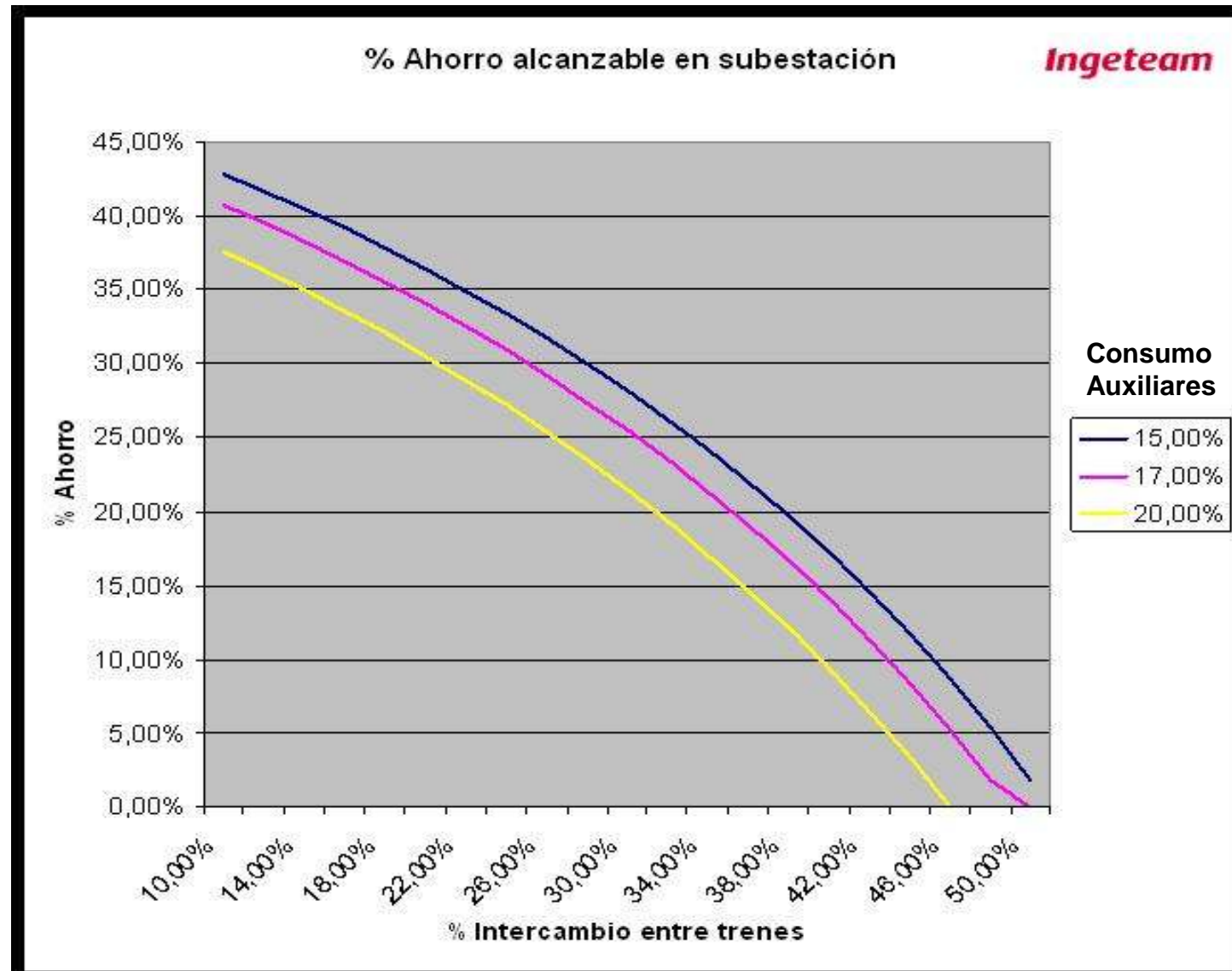
- Topología de la catenaria
- Tensión de catenaria
- Tensión de la red de alimentación
- Número y posición de las subestaciones
- Perfil de la línea
- Frecuencia del tráfico de trenes
- Tipos de trenes utilizados
- Etc..

Por lo tanto, cada red necesita un análisis y solución a medida

Es necesario realizar un trabajo previo para dimensionar la solución óptima con el mejor ROI (Return of Investment)

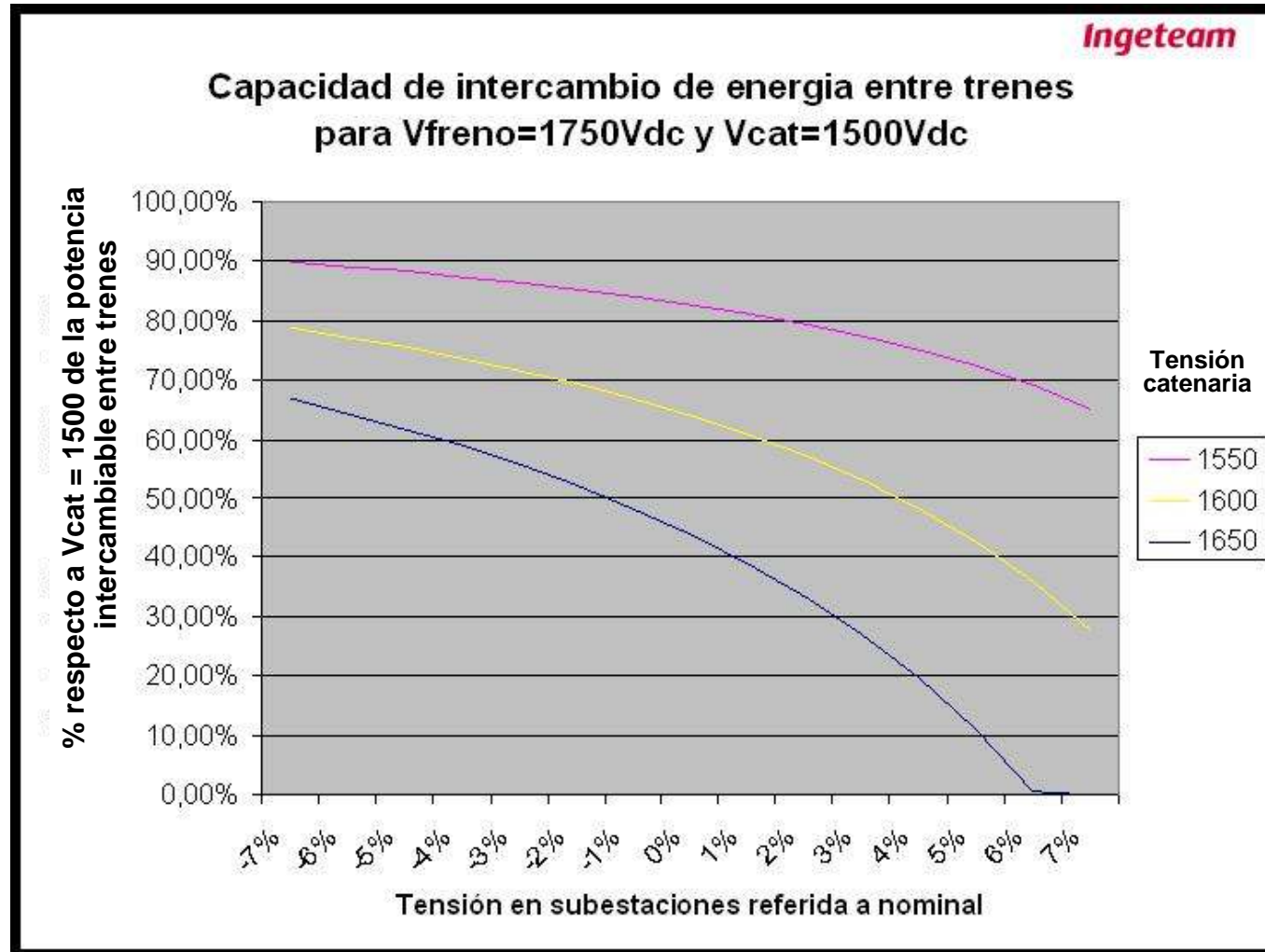
Fases Implementación Ingeber (I): Introducción

Ahorro vs Intercambio



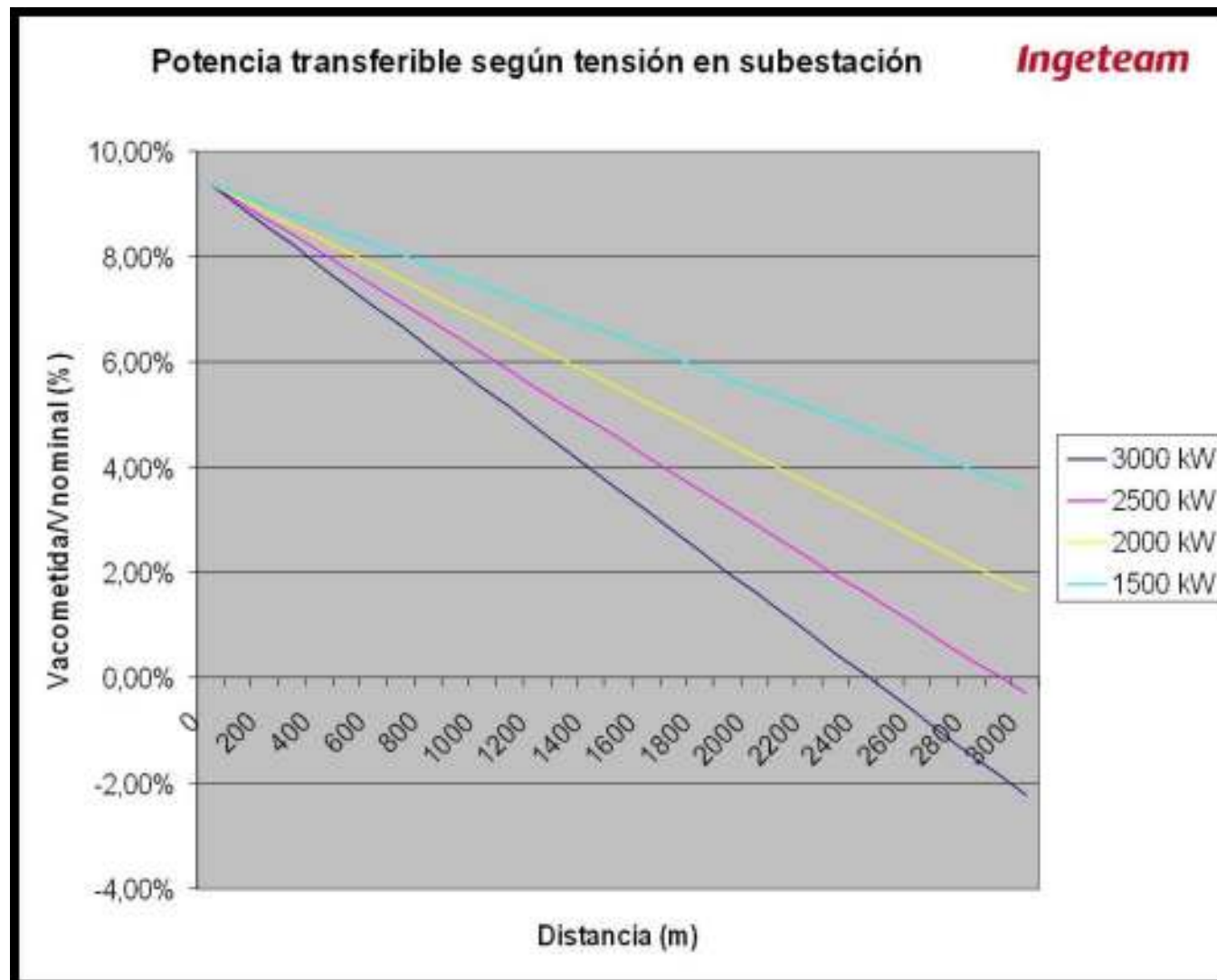
Fases Implementación Ingeber (I): Introducción

Devolución vs $V_{\text{Subestación}}$



Fases Implementación Ingeber (I): Introducción

Distancia Devolución vs $V_{\text{Subestación}}$

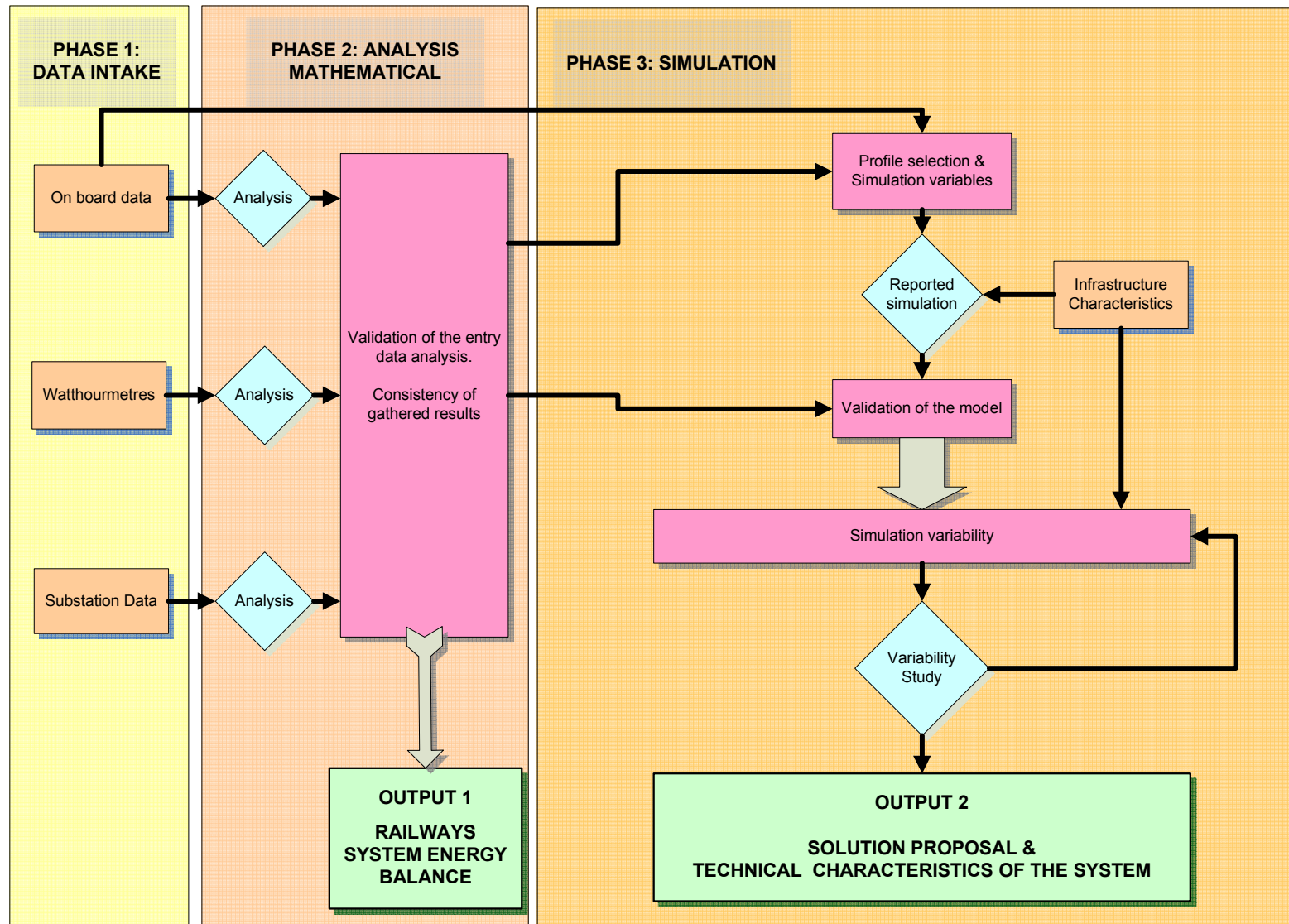


Fases Implementación Ingeber (II): Definición de fases

Las fases en la implementación del sistema son:

- **Fase I: Recogida de Datos**
- **Fase II: Análisis Matemático**
- **Fase III: Simulación**
- **Fase IV: Desarrollo de la Ingeniería**
- **Fase V: Implantación y puesta en marcha**

Fases Implementación Ingeber (III): Primeras fases



Implementación Ingeber (IV): Fase I -> Recogida de Datos



- Datos de trenes existentes
- Medidas embarcadas en caso necesario:
 - Tensión
 - Corriente
 - Velocidad

- Datos de perfiles de línea y operación
- Datos de las subestaciones.
- Medidas en caso necesario de:
 - Tensiones de catenaria
 - Tensiones de red
 - Corrientes en los feeders



- Datos de Watiometros con
 - Tiempo de trabajo
 - Distancia
 - Energía consumida y recuperada en cada punto.

Implementación Ingeber (V): Fase II -> Análisis Matemático

ANALISIS DE LOS DATOS

A Bordo :

- Balance de Energía: Consumo, recuperación y quemado en resistencias.
- Consumo de sistemas auxiliares
- Resistencia al avance de los trenes.
- Variaciones de timetables y sincronización de trenes.
- Distribución geográfica de la energía no reutilizada

Wattímetros

- Balance de energía: Energía consumida y recuperada.
- Energía consumida y recuperada vs. km
- Medias de consumo y tasas de variación históricas.

Subestación :

- Consumo neto de tracción
- Distribución de consumo
- Influencia de la tensión de alimentación
- Análisis de la tensión de catenaria en el punto de la subestación.

Implementación Ingeber (VI): Fase III -> Simulación

La herramienta de simulación desarrollada por Ingeteam permite analizar las distintas variables que influyen en la solución, tales como:

- Time-table de operación
- Tipos de trenes
- Valores nominales de tensión de línea
- Puntos de implementación de sistemas de recuperación
- Etc.

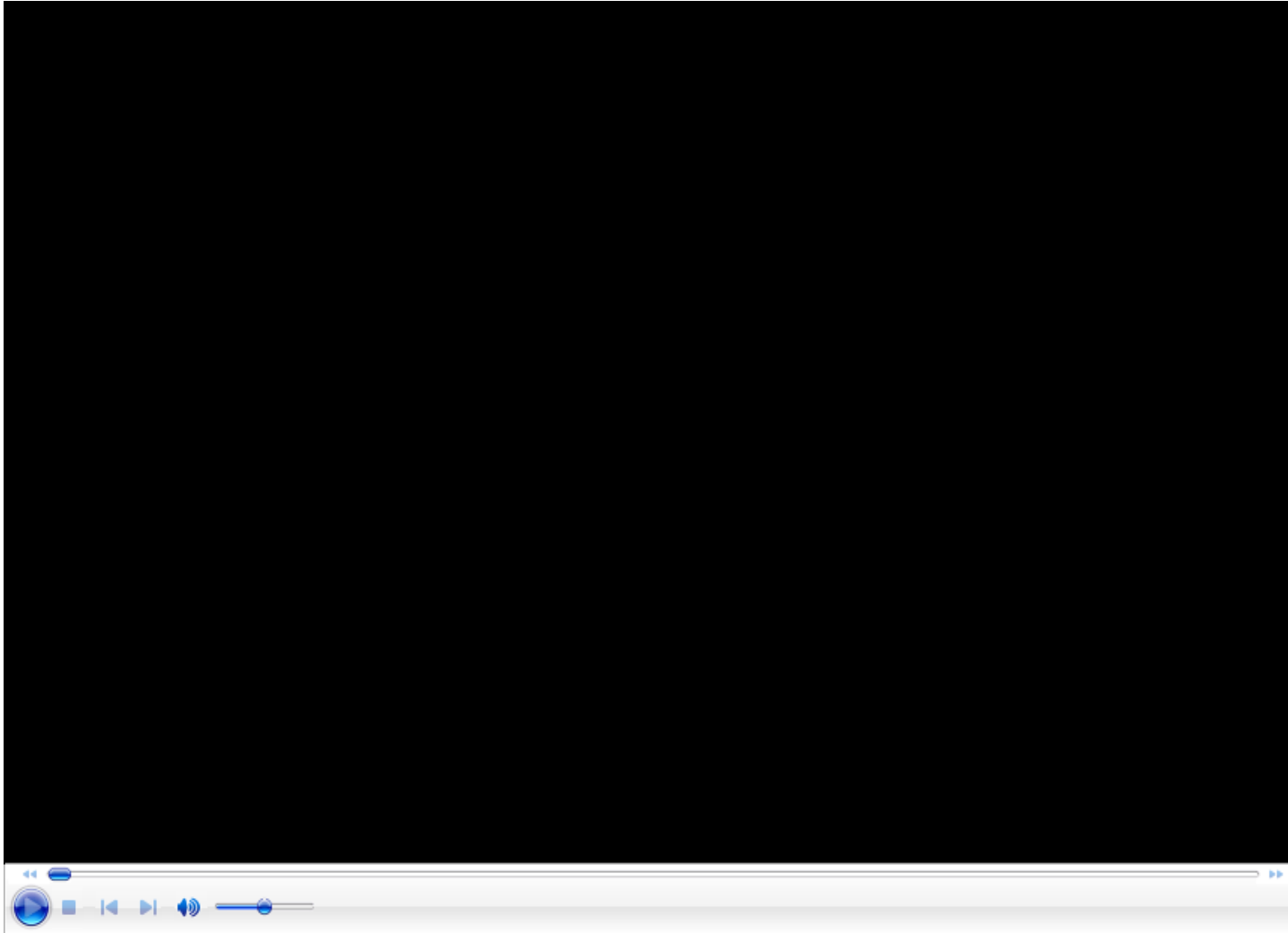
Está basada en una matriz de impedancias variables en el tiempo, que analiza la tensión, corriente, energía y potencia en los puntos de la red.

Resultado:

- Validación del modelo matemático y resultado de balance energético.
- Número de subestaciones a equipar.
- Potencia óptima de cada convertidor.
- Ahorro alcanzable.
- Periodo amortización de la inversión

Implementación Ingeber (VII): Fase III -> Simulación

Ingeteam



Implementación Ingeber (VIII): Fases IV/V -> Realización

Con los datos anteriores se realiza la propuesta de ingeniería que contempla

- Número de sistemas de recuperación a instalar
- Localización de cada uno de los sistemas
- Potencia de cada uno de los sistemas

Finalmente, Ingeteam suministra los equipos y puede participar en la implantación y puesta en marcha de los mismos



Ejemplo de Implementación: Metro Bilbao

Ejemplo Metro Bilbao (I)



metro bilbao



Ejemplo Metro Bilbao (II): Datos de la línea



metro bilbao

Subestaciones
Ariz-Cocheras
Bolueta
Abando
Lutxana
Lamiako
Aiboa
Larrabasterra
Sopelana-Cocheras
Anso
Urbinaga

TENSIÓN CATENARIA: 1.500 Vdc

Ejemplo Metro Bilbao (III): Datos de Partida



metro bilbao

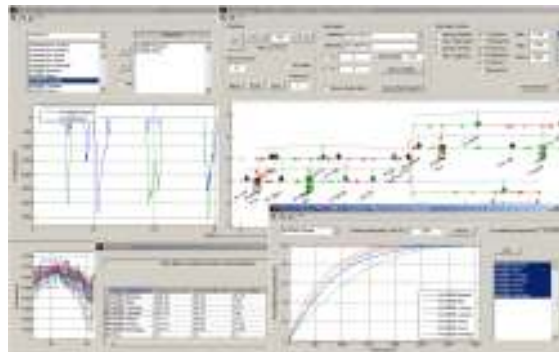
- ❖ Perfil real de las líneas 1 y 2 de MB con la correspondiente ubicación de **subestaciones**.
- ❖ Registros reales de Esfuerzo, Corriente, Tensión y Potencia en función de la velocidad en todo el perfil de las líneas 1 y 2, realizados sobre:
 - ❖ Distintas unidades
 - ❖ Distintos horarios
 - ❖ Distintas cargas
- ❖ **Frecuencias de trenes** reales teóricas para cada uno de los tramos de las líneas 1 y 2 de MB.

Ejemplo Metro Bilbao (IV): Proceso de Simulación



metro bilbao

- ❖ Partiendo de los datos reales, se obtienen
 - ❖ Potencia disponible en cada punto.
 - ❖ Velocidad de las unidades en cada posición de la red.
- ❖ Se han realizado varias simulaciones,
 - ❖ Configuración y distribución actual de subestaciones de MB
 - ❖ Nueva configuración de subestaciones propuesta.
 - ❖ Distintas tensiones de catenaria.
 - ❖ Distintos horarios.
 - ❖ Con retardos de sincronización aleatorios.
- ❖ De todas las simulaciones se ha extrapolado:
 - ❖ Media del funcionamiento del sistema completo para determinar ahorro anual



Ejemplo Metro Bilbao (V): Resultado de la Simulación



metro bilbao

- ❖ El 52% de la energía de tracción es regenerada en la frenada:
 - ✓ 44% de la energía de tracción devuelta a catenaria
 - ✓ 8% de la energía de tracción quemada en las resistencias
- El 7% de la energía de tracción se pierde en la catenaria
- ❖ El 8% de la energía total en juego en el proceso de tracción supone un 13,05% de la energía neta extraída de la red para tracción. Éste es el ahorro teórico máximo.

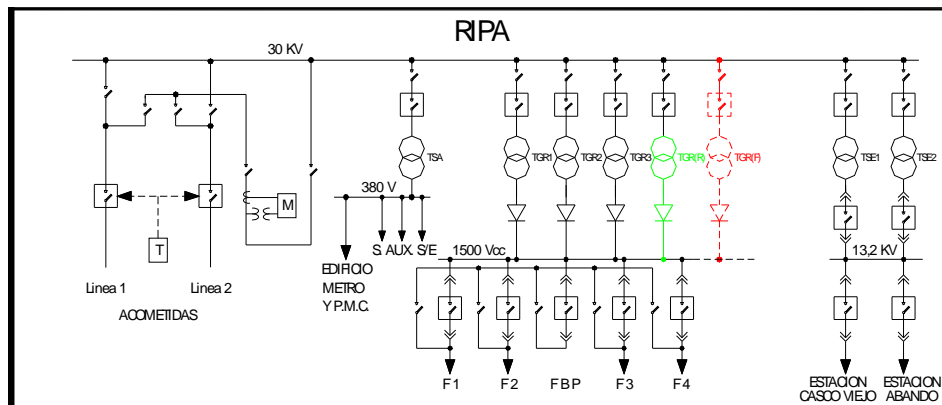
Objetivo Global del proyecto (Toda la red)

- ❖ Energía cogenerada = 0,1305 x 52.500 MW.h = 6.851,3 MW.h

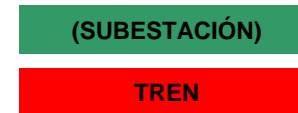
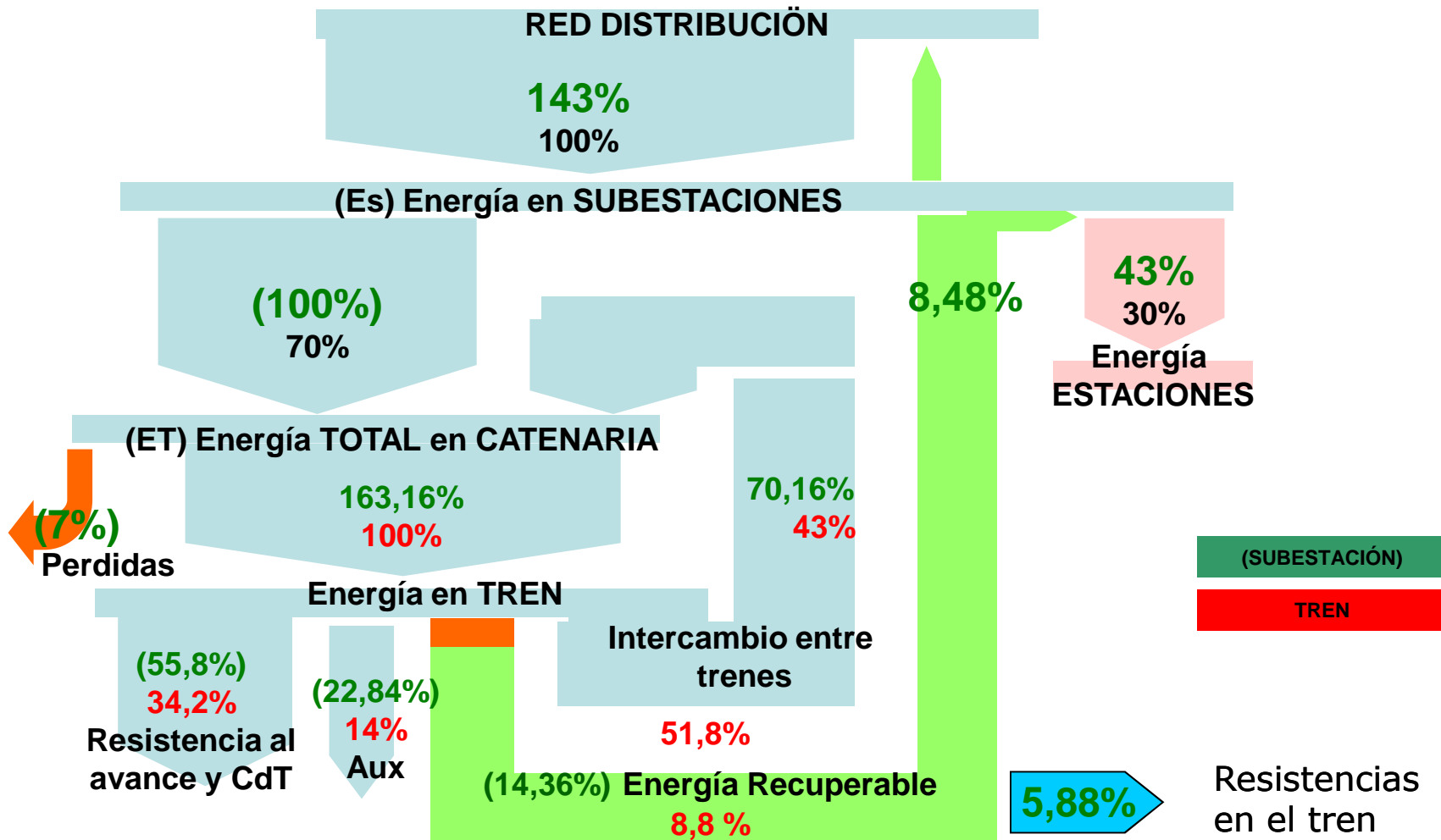
Ejemplo Metro Bilbao (VI): Datos Implementación Piloto



- ❖ Se ha implementado el sistema en una primera implementación piloto, en la subestación de Ripa.
- ❖ Subestación de Ripa: Seleccionada por ser la que tiene las condiciones menos favorables para la recuperación, para demostrar la idoneidad del sistema.
 - ❖ Subestación del tramo de mayor tráfico y frecuencia, en el que existe un mayor intercambio entre los trenes.
 - ❖ Tensión de red elevada.



Ejemplo Metro Bilbao (X): Flujo de Energía

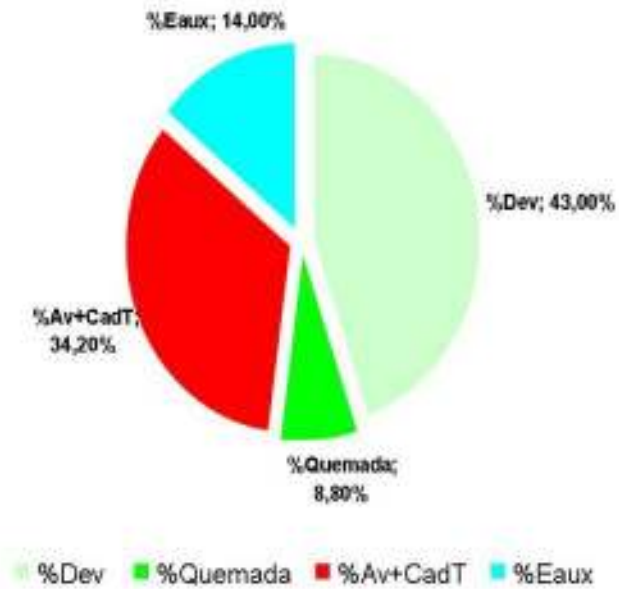


Ejemplo Metro Bilbao (XI): Flujo de Energía

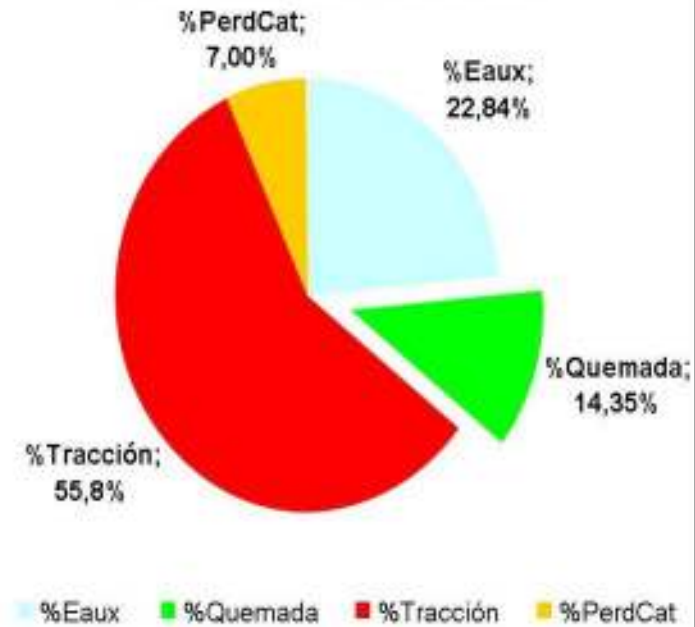


metro bilbao

Balance Energético Trenes



Balance Energético Subestaciones



Ejemplo Metro Bilbao (XII): Ahorro Implementación Piloto



metro bilbao

Datos reales							
85	Laborables	2.640	kWh/día				
22	Viernes N	800	kWh/día				
24	Sábado	3.130	kWh/día				
19	Sábado N	1.880	kW/h	R semana =	23.080	} 13,3%	R anual 1.203.391,20 kWh/año
20	Domingo	4.050	kW/h	E consumo en tracción =	167.879 kWh		

**Devolución de energía residual anteriormente disipada en resistencias de freno:
1.204 MW.h**

Ejemplo Metro Bilbao (XIII): Conclusiones



metro bilbao

- ❖ El ahorro real en Ripa 1,2 millón/kWh con una potencia instalada 1,5 MkW. Se podría instalar más para recuperar más pero el Δ de potencia no compensa el ahorro de energía
- ❖ Período de amortización de la inversión 6 años
- ❖ La energía devuelta regulada por el RD-1011-2009 que modifica el RD 1955/2000 de 1 de Diciembre, así como el proceso de legalización de la instalación que es sencillo y rápido
- ❖ La instalación pequeña autónoma e independiente. En caso de avería se desconecta automáticamente sin afectar a la subestación a la que pertenece en realidad
- ❖ La energía generada cumple los requisitos de calidad establecidos por el suministrador, tanto en pulso como en calidad de la onda

Ejemplo Metro Bilbao (XIV): Instalación Piloto



Equipo de potencia

Control: in-situ o remoto

Ejemplo Metro Bilbao (XV): Instalación Piloto

Todo el sistema se han implementado en 7,5 m²

Trafo ←



Sistema Ingeber instalado subestación Ripa

Destino de la Energía

Destino de la Energía (I): Introducción

La Energía devuelta a red puede tener dos destinos

- **Utilización interna en la propia red del operador.**
- **Devolución a la red general de suministro.**

Para devolver a la red, es necesario un marco legislativo que permita que en la factura de la energía se descuente la energía retornada.

En España, dicha devolución se ha regulado en el RD 1011-2009

Destino de la Energía (II): Legislación

10220 *Real Decreto 1011/2009, de 19 de junio, por el que se regula la Oficina de Cambios de Suministrador.*

«Disposición adicional duodécima. *Vertidos a la red de energía eléctrica para consumidores que implanten sistemas de ahorro y eficiencia.*

1. Los consumidores de energía eléctrica conectados en alta tensión que debido a la implantación de un sistema de ahorro y eficiencia energética dispongan en determinados momentos de energía eléctrica que no pueda ser consumida en su propia instalación podrán ser autorizados excepcionalmente por la Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a verter dicha energía a la red siempre que cumplan los siguientes requisitos:

a) Que presenten certificado del gestor de la red a la que estén conectados acreditativo de haber obtenido el derecho de acceso para verter energía eléctrica de conformidad con lo previsto en el Título IV de este real decreto.

b) Que presenten un proyecto de las medidas de ahorro y eficiencia a adoptar indicando la incidencia en su consumo de energía eléctrica.

2. Para la facturación del suministro la energía vertida a la que se refiere el apartado anterior será descontada en cada hora de la energía eléctrica adquirida por el titular de la instalación. El saldo horario resultante entre la energía eléctrica adquirida y la energía vertida a la red no será en ningún caso negativo.

3. La energía vertida, a la que se refiere el apartado 1, podrá ser objeto de expedición de las garantías de origen de eficiencia que reglamentariamente se establezcan.

Destino de la Energía (III): Ejemplo de Certificado



Certificado de concesión del permiso de conexión a la red de distribución

Dña. Ana Lafuente González, con N.I.F. nº 21.470.355-Q, en nombre y representación de la empresa IBERDROLA DISTRIBUCION ELECTRICA, S.A.U., propietaria del punto de conexión de la red de distribución.

CERTIFICO

Para el proyecto "Mejora de la eficiencia energética y reutilización de energía limpia en Metro Bilbao" ubicado en las líneas de 30 kV Larraskitu-Metro I y II, STC 8252 "Metro Bilbao Ripa" de potencia 1.500 (kW) y cuyo titular es Metro Bilbao, lo siguiente:

1. La instalación puede afectar a la red de transporte o a la operación del sistema según lo establecido en el artículo 63 del Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por lo que se ha dado traslado de este hecho al operador del sistema y gestor de la red de transporte, quien ha informado al respecto de forma:

- a. Favorable
- b. Desfavorable o informativa

La instalación no se encuentra en el ámbito de aplicación del artículo 63 del Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por lo que no se ha dado traslado de este hecho al operador del sistema y gestor de la red de transporte.

(Marcar la opción que corresponda de las tres anteriores)

2. A la instalación le ha sido otorgado permiso de conexión a la red con fecha 24 de Agosto de 2009
3. El permiso de conexión referido sigue vigente a la fecha del presente certificado.
4. El punto de conexión se encuentra en STC 8252 "Metro Bilbao Ripa" y su ubicación detallada es: líneas de 30 kV Laraskitu-Metro I y II, STC 8252 "Metro Bilbao Ripa"

Fdo.: Dña.



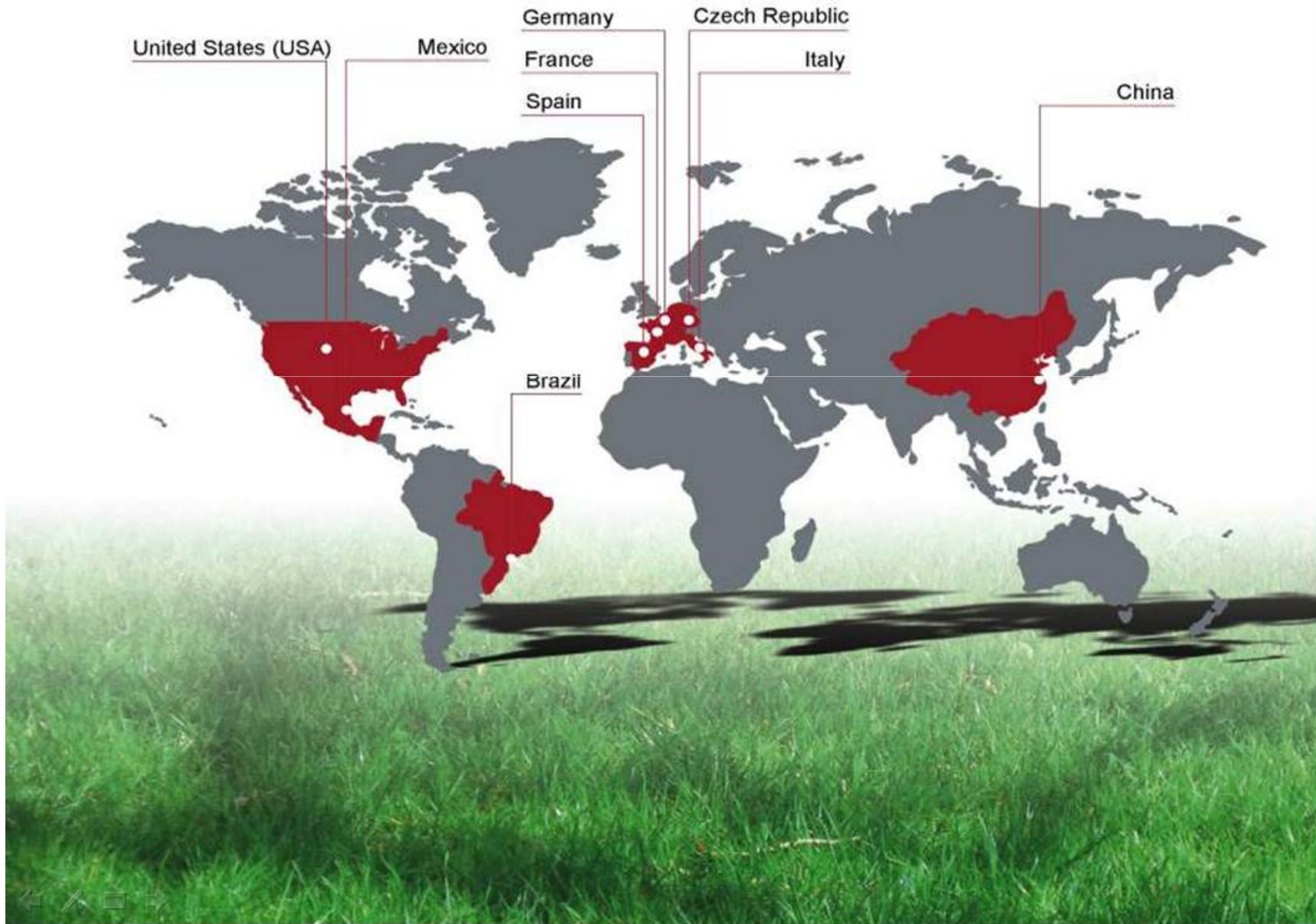
Fecha: 27-10-2009

El documento de apoderamiento obra en poder de la Dirección General de Política Energética y Minas, del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Ingeteam

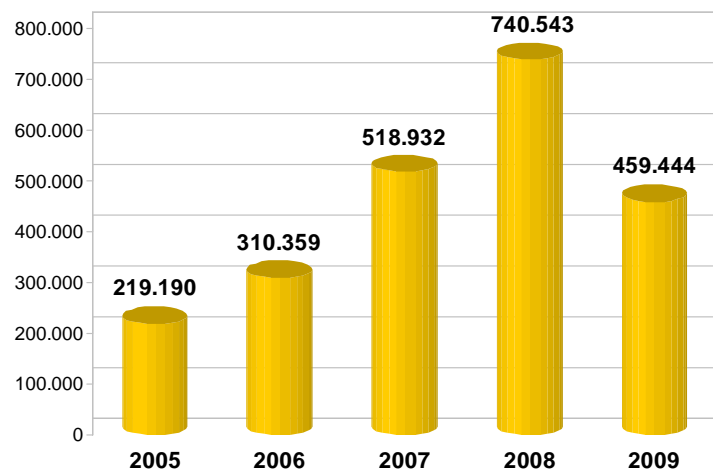
Ingeteam

Ingeteam (I): Implantación geográfica

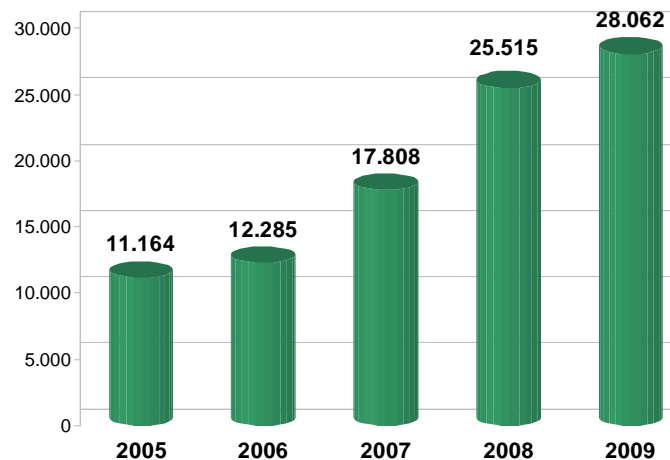


Ingeteam (II): Datos básicos de negocio

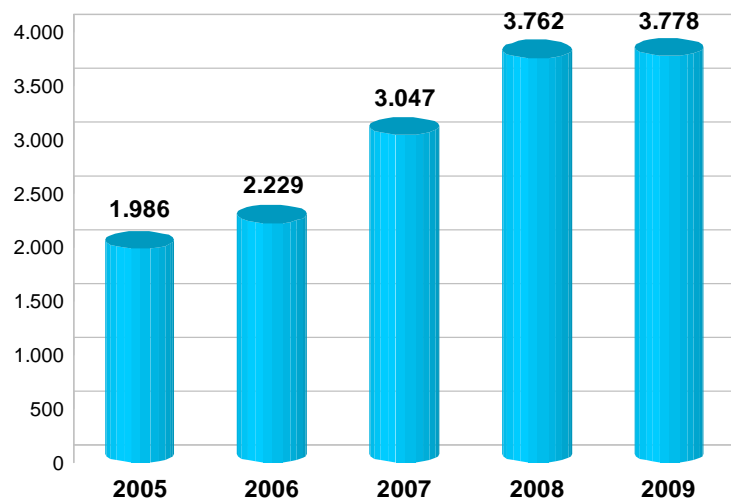
Cifra de negocios
(Miles euros)



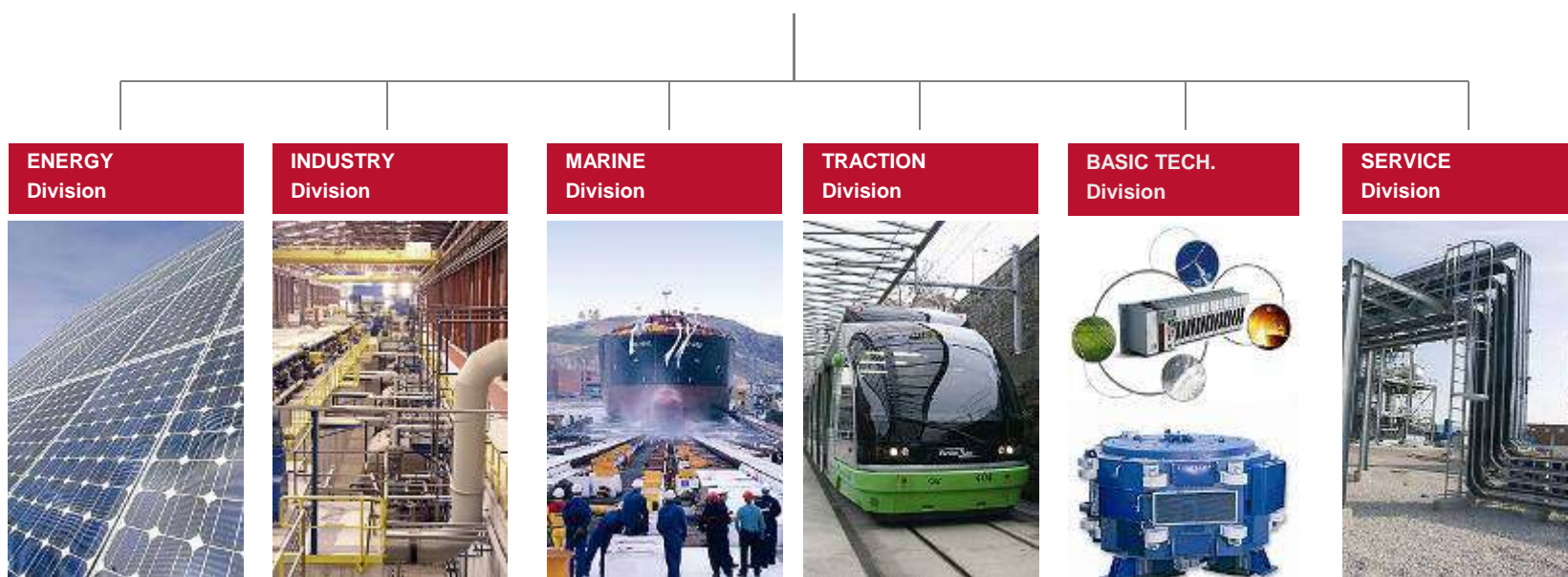
I+D+I
(Miles euros)



Personal



Ingeteam (III): Estructura orientada al cliente



Ingeteam (III): Experiencia en equipos de potencia en tracción

Ingeteam



Muito Obrigado Pela Sua Atenção