

El reto de Kioto. Alternativas energéticas en Castilla-La Mancha

**La energía eólica: el reto hecho
realidad**

Emilio Gómez Lázaro

Ciudad Real, abril de 2005



Índice

- **Estado energía eólica**
- **Régimen económico del régimen especial**
- **Máquinas eléctricas rotativas**
- **Empleo de las máquinas eléctricas como generadores eólicos**
- **Aerogenerador a velocidad constante**
- **Aerogenerador a velocidad variable**



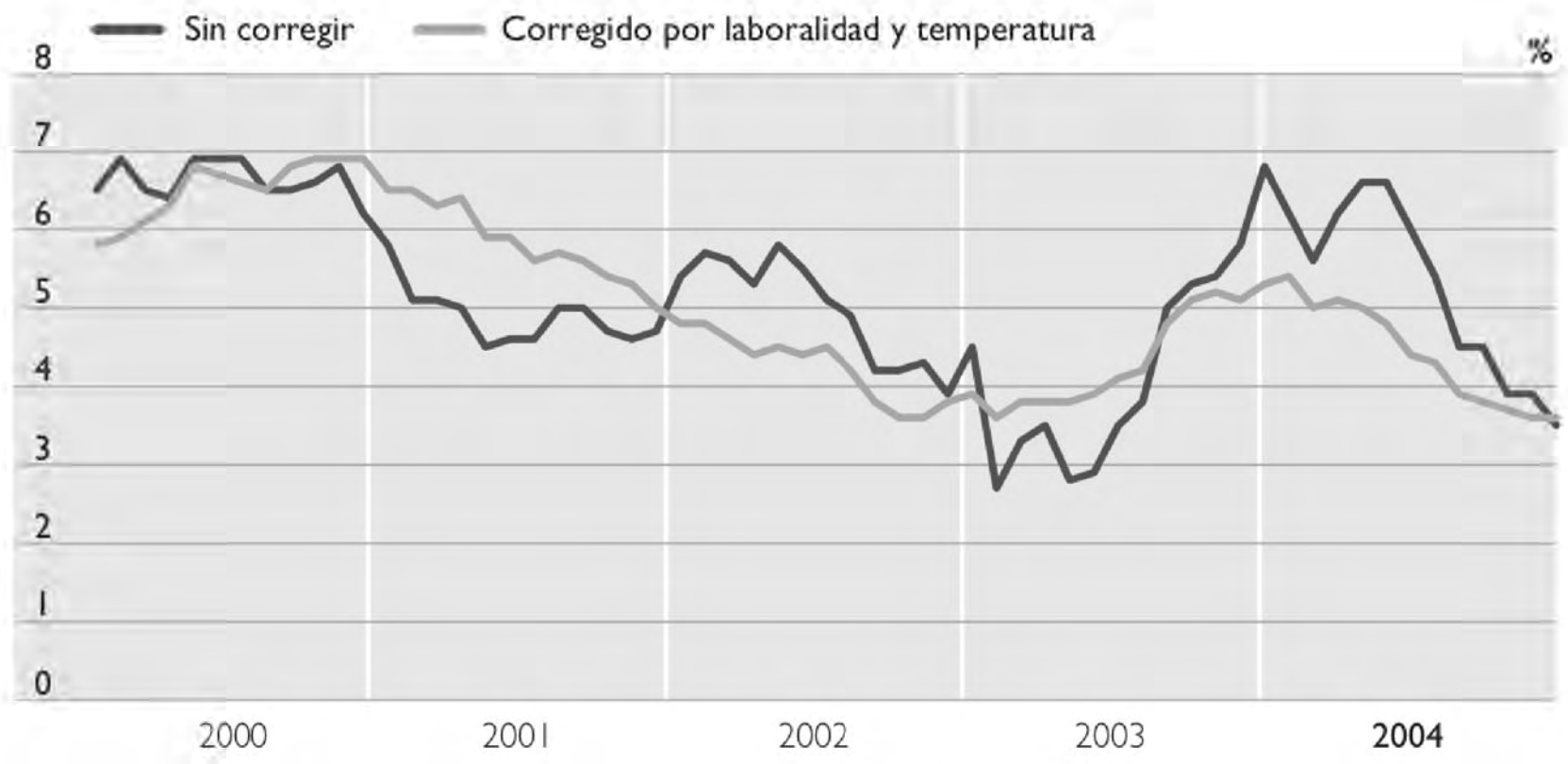
Estado de la energía eólica



Demanda eléctrica en España

Crecimiento anual de la demanda eléctrica en España

Fuente: El sistema eléctrico español. Avance del informe 2004. REE



Demanda eléctrica en España

Fuente: REE

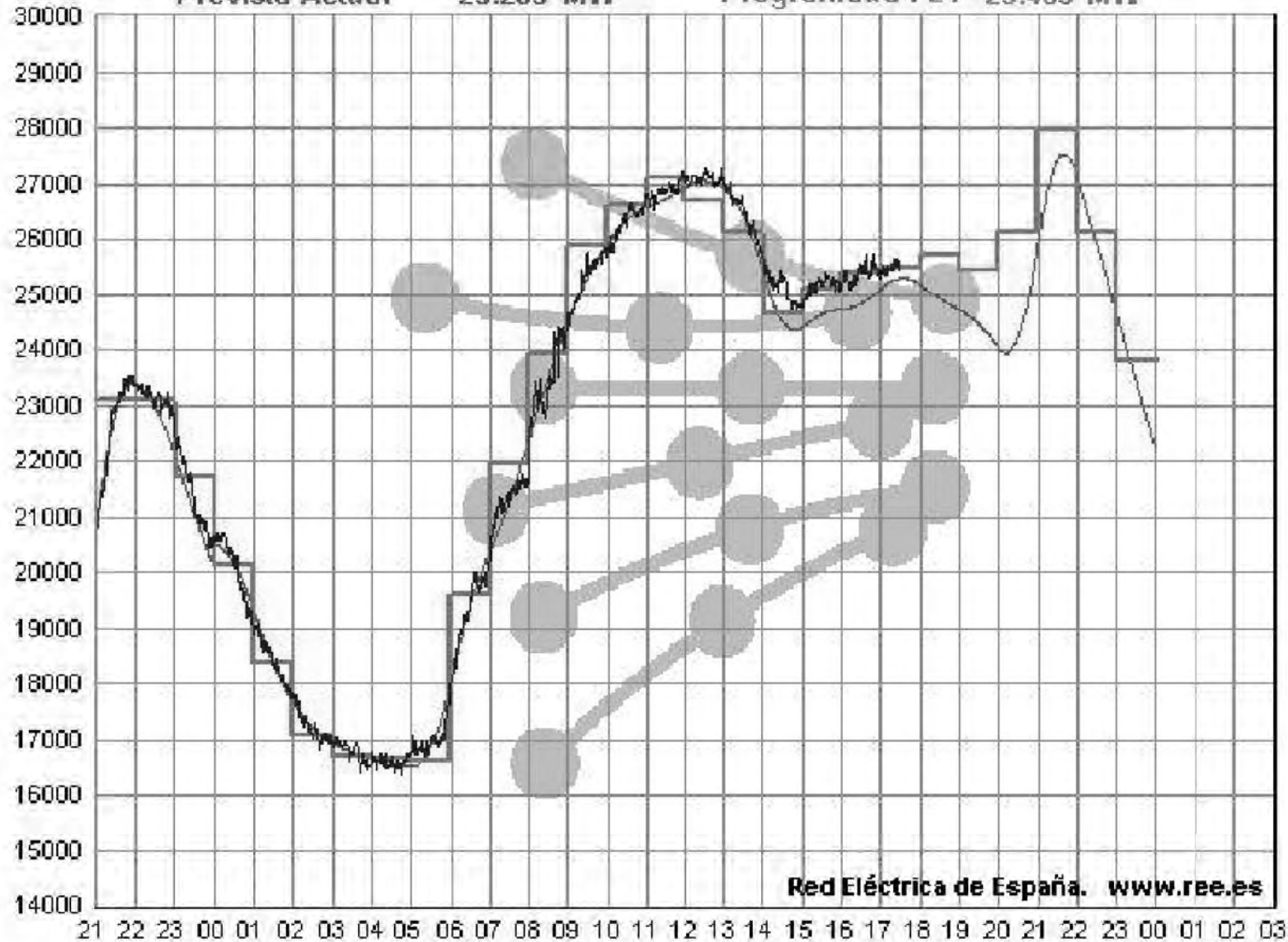
Demanda de energía eléctrica

Lunes, 28 Abr 2003 17:27:17

Prevista Actual 25.283 MW

Demanda Real 25.470 MW

Programada P24 25.483 MW



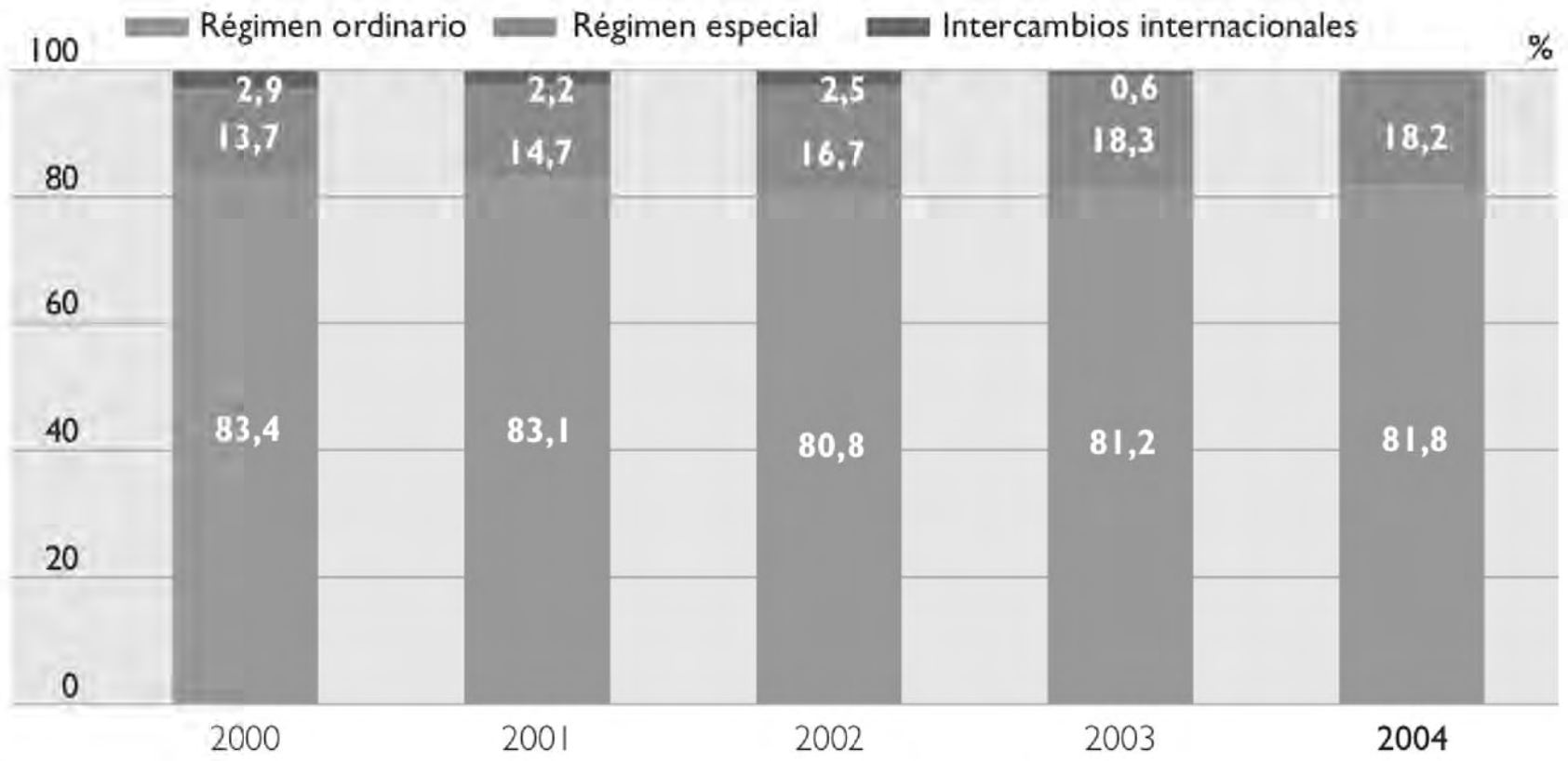
Red Eléctrica de España. www.ree.es



Generación de electricidad de origen eólico

Aportación del régimen especial

Fuente: El sistema eléctrico español. Avance del informe 2004. REE





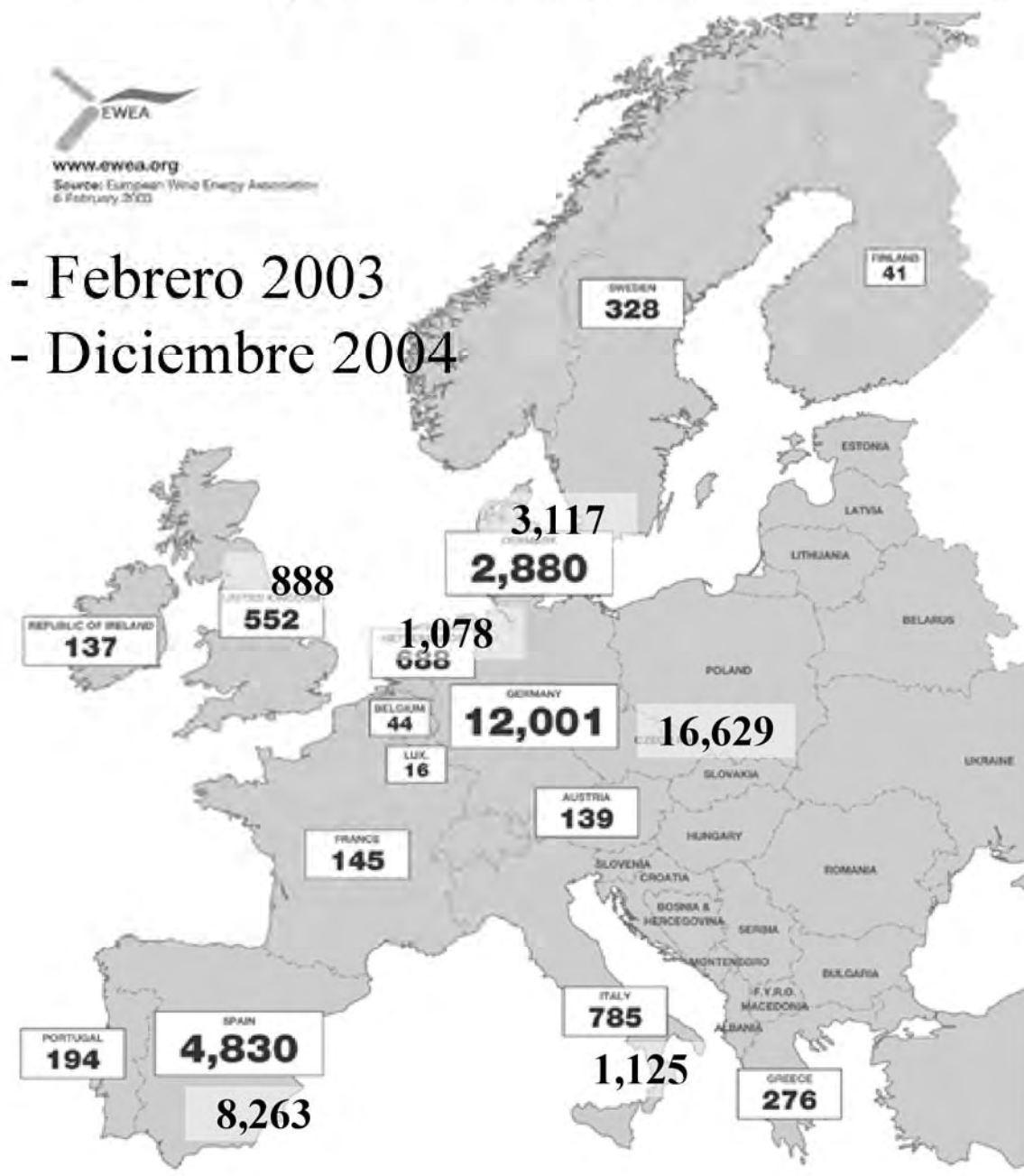
Generación de electricidad de origen eólico

Potencia eólica (MW) instalada en Europa

Fuente: European Wind Energy Association (EWEA)



- Febrero 2003
- Diciembre 2004

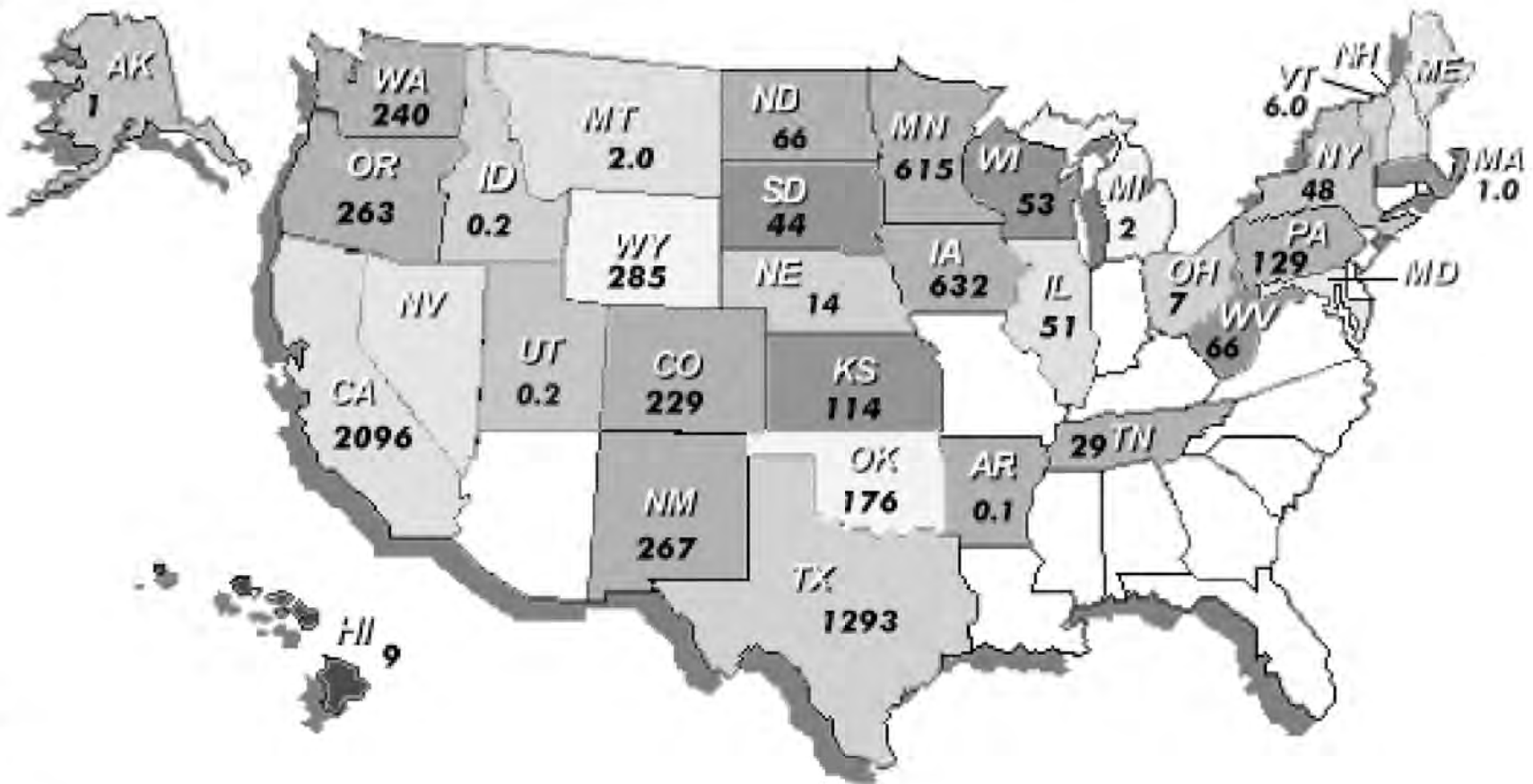


Generación de electricidad de origen eólico

Potencia eólica (MW) instalada en Estados Unidos

Fuente: American Wind Energy Association (AWEA)

Potencia eólica instalada: 6,740 MW Enero 2005



Generación de electricidad de origen eólico

Potencia eólica (MW) instalada en los 10 primeros países durante 2004

Fuente: Global Wind Energy Council (GWEC)

País	Potencia (MW)	% del total
<i>España</i>	2 065	25,9
Alemania	2 037	25,5
India	875	11,0
Estados Unidos	389	4,9
Gran Bretaña	240	3,0
Portugal	226	2,8
Italia	221	2,8
Holanda	197	2,5
China	197	2,5
Austria	192	2,4
<i>TOTAL 10 países</i>	6 639	83,2
<i>Resto del mundo</i>	1 337	16,8
<i>TOTAL 10 países</i>	7 976	100,0



Generación de electricidad de origen eólico

Balance eléctrico y potencia instalada en España

Fuente: El sistema eléctrico español. Avance del informe 2004. REE

Potencia instalada a 31 de diciembre (MW)

	Peninsular	Extrapeninsulares	Total nacional
Hidráulica	16.657	1	16.658
Nuclear	7.876	-	7.876
Carbón	11.565	510	12.075
Fuel / Gas	6.930	3.023	9.953
Ciclo combinado	8.259	0	8.259
Total régimen ordinario	51.287	3.534	54.821
Eólica	8.000	133	8.133
Resto régimen especial	7.497	114	7.611
Total régimen especial	15.497	247	15.745
Total	66.784	3.781	70.565





Generación de electricidad de origen eólico

Fuente: REE

Generación de energía eólica

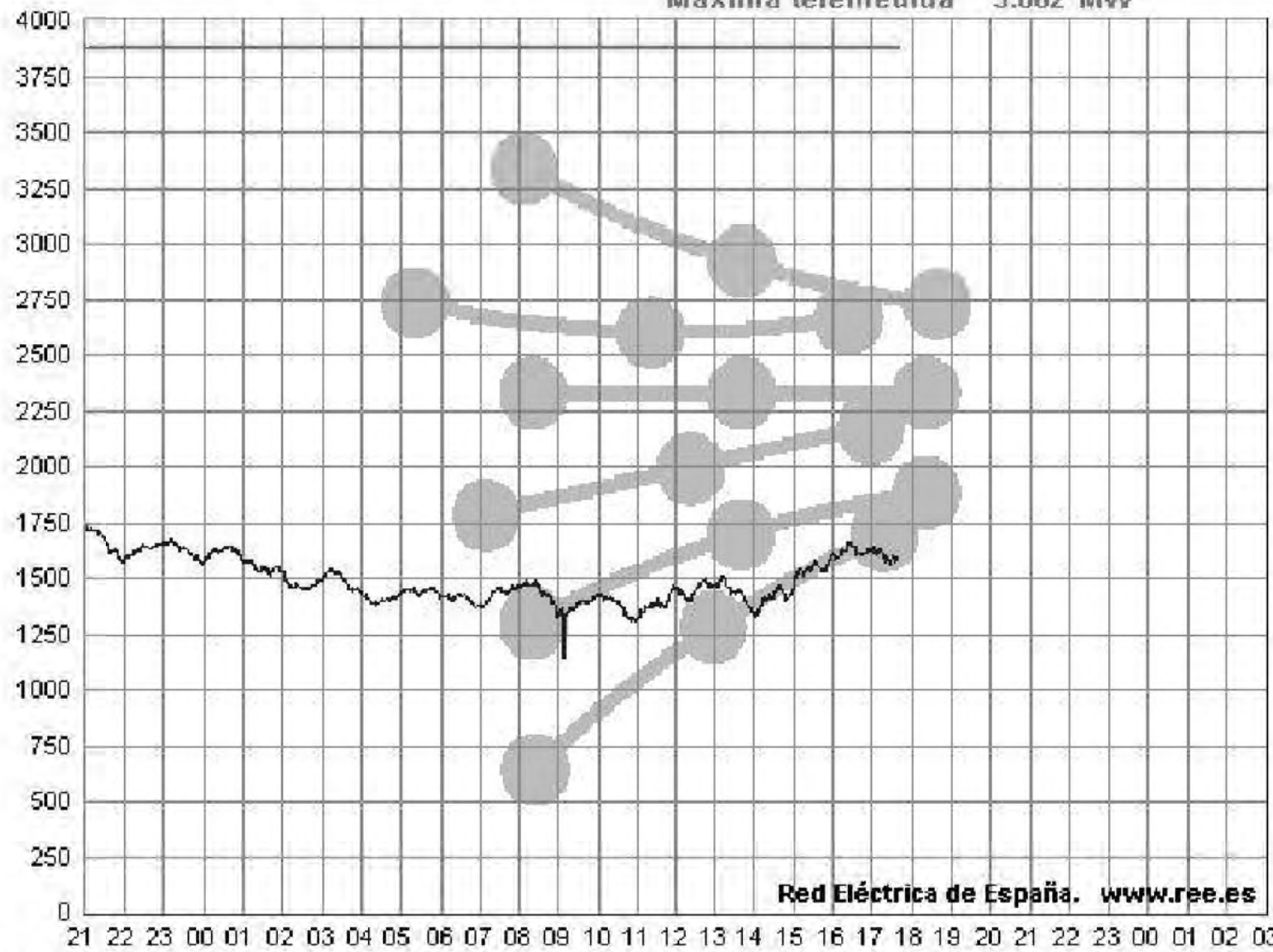
Lunes, 28 Abr 2003 17:35:36

Generación real

1.591 MW

Máxima telemedida

3.882 MW



Red Eléctrica de España. www.ree.es

Medida de producción eólica en tiempo real (80% de la potencia eólica total instalada en el sistema peninsular español)

Generación de electricidad de origen eólico

Balance eléctrico y potencia instalada en España

Fuente: El sistema eléctrico español. Avance del informe 2004. REE

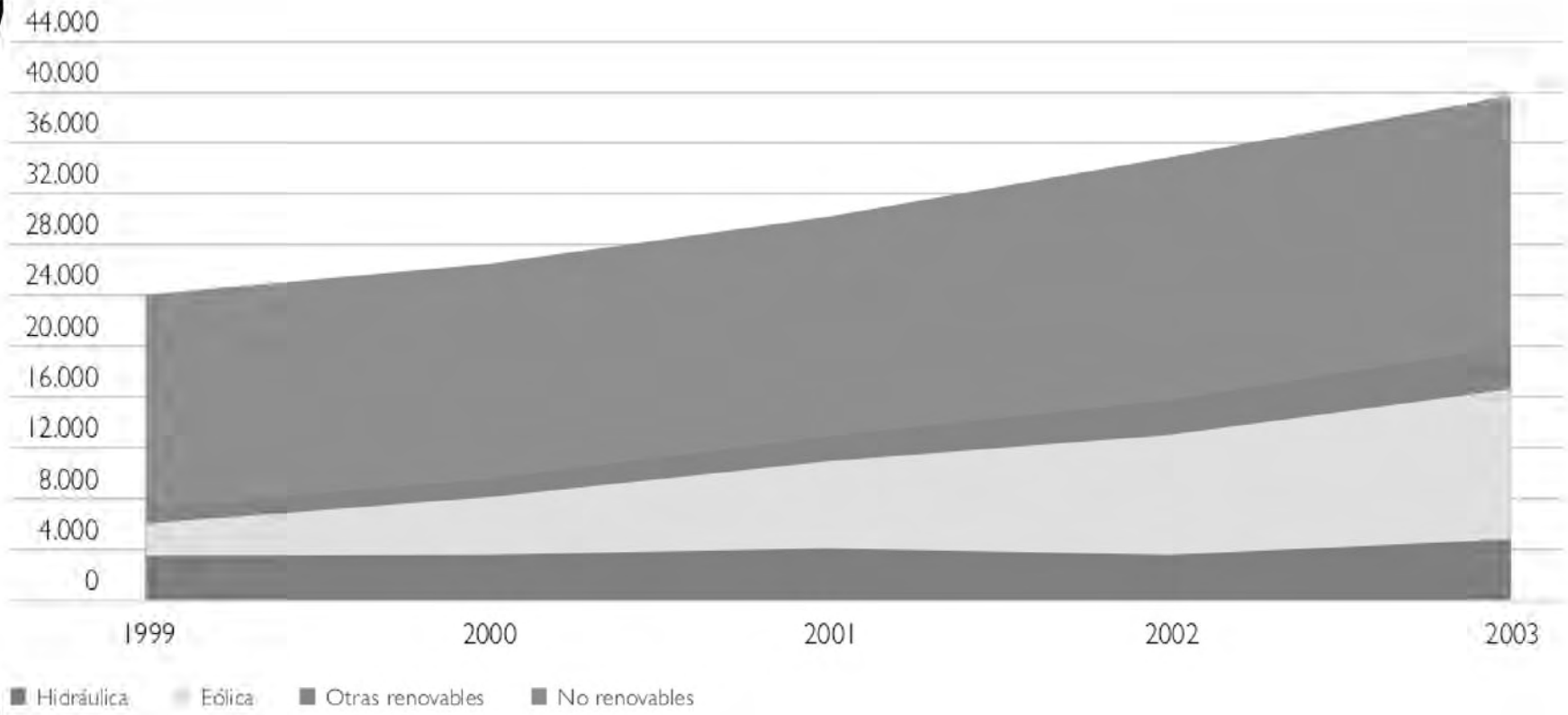
	Peninsular		Extrapeninsulares		Total nacional	
	GWh	% 04/03	GWh	% 04/03	GWh	% 04/03
Hidráulica	29.977	-22,7	0	-	29.977	-22,7
Nuclear	63.153	2,1	-	-	63.153	2,1
Carbón	76.234	5,5	3.737	5,3	79.971	5,5
Fuel / Gas	7.886	-1,9	10.271	8,0	18.157	3,5
Ciclo combinado	29.555	97,2	0	-	29.555	97,2
Producción bruta	206.806	5,6	14.008	7,2	220.814	5,7
- Consumos en generación	8.766	8,7	871	5,8	9.636	8,5
- Consumos bombeo	4.562	-2,5	-	-	4.562	-2,5
Producción neta	193.479	5,6	13.137	7,3	206.616	5,7
+ Intercambios internac.	-2.939	-	-	-	-2.939	-
+ Régimen especial	43.011	4,3	721	-1,1	43.732	4,2
Eólica	13.870	19,6	308	-9,9	14.178	18,8
Resto régimen especial	29.141	-1,7	413	6,7	29.554	-1,6
Demanda	233.551	3,5	13.858	6,9	247.409	3,7



Generación de electricidad de origen eólico

Energía adquirida al régimen especial (GWh)

Fuente: El sistema eléctrico español. Informe 2003. REE



Generación de electricidad de origen eólico

Energía adquirida al régimen especial (GWh)

Fuente: El sistema eléctrico español. Informe 2003. REE

	Andalucía	Aragón	Asturias	Baleares	Canarias	Cantabria	Castilla-La Mancha	Castilla y León	Cataluña	Ceuta
Renovables	1.882	2.951	813	130	344	232	2.107	2.247	1.374	0
Hidráulica	256	986	212	0	2	217	239	593	882	0
Eólica	477	1.901	147	0	342	0	1.762	1.522	161	0
Otras renovables	1.149	64	454	130	0	15	106	132	331	0
Biomasa	1.149	64	62	0	0	7	105	132	47	0
R.S. Industriales	0	0	392	0	0	0	0	0	24	0
R.S. Urbanos	0	0	0	130	0	8	0	0	259	0
Solar	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
No renovables	3.360	1.517	265	8	247	1.339	1.000	1.525	4.404	0
Calor residual	57	0	0	8	4	0	0	0	0	0
Carbón	0	0	0	0	0	535	0	0	0	0
Fuel-Gasoil	325	195	142	0	0	17	287	185	479	0
Gas de refinería	274	0	0	0	243	0	0	0	0	0
Gas natural	2.704	1.322	123	0	0	787	713	1.340	3.925	0
Total 2003	5.242	4.468	1.078	138	591	1.571	3.107	3.772	5.778	0
Total 2002	4.680	3.537	1.022	126	606	1.327	2.490	2.980	5.697	0
Δ% 2003/2002	12,0	26,3	5,5	10,0	-2,5	18,4	24,8	26,6	1,4	-



Generación de electricidad de origen eólico

Energía adquirida al régimen especial (GWh)

Fuente: El sistema eléctrico español. Informe 2003. REE

	C.Valenciana	Extremadura	Galicia	La Rioja	Madrid	Melilla	Murcia	Navarra	País Vasco	Total
Renovables	196	31	4.690	512	380	0	68	2.162	309	20.428
Hidráulica	26	31	813	52	132	0	32	347	115	4.935
Eólica	108	0	3.554	457	0	0	24	1.589	96	12.140
Otras renovables	62	0	323	3	248	0	12	226	98	3.353
Biomasa	16	0	37	0	7	0	12	223	62	1.923
R.S. Industriales	45	0	286	0	46	0	0	0	35	828
R.S. Urbanos	0	0	0	3	194	0	0	0	0	594
Solar	1	0	0	0	1	0	0	3	1	8
No renovables	1.495	20	2.189	137	722	0	627	249	959	20.063
Calor residual	9	0	0	0	0	0	0	0	75	153
Carbón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	535
Fuel-Gasoil	106	0	1.104	5	40	0	124	2	28	3.039
Gas de refinería	29	0	0	0	0	0	0	0	0	546
Gas natural	1.351	20	1.085	132	682	0	503	247	856	15.790
Total 2003	1.691	51	6.879	649	1.102	0	695	2.411	1.268	40.491
Total 2002	1.588	30	6.172	507	899	0	578	2.299	1.288	35.825
Δ% 2003/2002	6,5	70,0	11,5	28,0	22,6	-	20,2	4,9	-1,6	13,0



Generación de electricidad de origen eólico

Potencia instalada (MW) en España por Comunidades

Fuente: Potencia eólica según el Registro de productores en régimen especial (Total: 8263 MW). 31 diciembre 2004



Generación de electricidad de origen eólico

Potencia instalada (MW) Castilla-La Mancha por provincias

Fuente: Potencia eólica según el Registro de productores en régimen especial. (Total: 1567 MW). 31 diciembre 2004



Generación de electricidad de origen eólico

Objetivos del Plan Energético Regional de CLM (PERCAM)

- **Conseguir una participación del 22% de las energías renovables en la producción de electricidad**
- **Reducir la intensidad energética regional un 1% anual hasta el año 2010 con respecto al año 2000, situándose en el entorno de 0,182 kep/€**
- **Abastecer el consumo de electricidad en usos finales en el año 2010 con fuentes renovables, pasando de un potencia instalada con estas fuentes de 354 MW en el año 2000 a 4.744 MW en 2010 (4.009 MW procedentes de parques eólicos)**
- **Incrementar la cuota de participación de las energías renovables en los consumos energéticos finales pasando de 9.732 tep en el año 2000 a 377.754 tep en el 2010**



Régimen económico del régimen especial



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona



Régimen especial. Real Decreto 436/2004

Introducción

- En una sociedad moderna y avanzada como la española, el progreso científico y tecnológico va naturalmente acompañado de una cada vez mayor sensibilidad social hacia el medio ambiente. El concepto de desarrollo sostenible se erige así en uno de los elementos clave de la política económica de cualquier Gobierno. La actividad de producción de energía eléctrica, como los demás sectores industriales, no puede ser ajena a estos planteamientos. El agua de nuestros ríos, la fuerza del viento o el calor proveniente del sol son fuentes limpias e inagotables de producción de energía eléctrica que deben ser fomentadas por los estamentos públicos...
- Tiene por objeto unificar la normativa en lo que se refiere a la producción de energía eléctrica en régimen especial, en particular al régimen económico de estas instalaciones. En concreto trata de instaurar de forma clara y estable las condiciones necesarias para adquirir por el sistema eléctrico energía de origen renovable y cogeneración.
- Las instalaciones de producción de energía eléctrica que conforman el denominado «régimen especial», las cuales disfrutan de una cierta singularidad jurídica y económica frente al resto de instalaciones de producción integrantes del llamado «régimen ordinario».

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

Régimen especial. Real Decreto 436/2004

Mecanismos de retribución

- **Ceder electricidad a la empresa distribuidora:**
 - Se utiliza una tarifa regulada, única para todos los períodos de programación
 - El precio de venta se fija según un tanto por ciento de la tarifa eléctrica media o de referencia cada año
- **Vender energía eléctrica al mercado libremente:**
 - A través del sistema de ofertas gestionado por el operador del mercado, del sistema de contratación bilateral y/o a plazo. Se puede usar un agente vendedor
 - El precio de venta se fija en el mercado complementado por un incentivo y/o prima
 - La prima se fija según un tanto por ciento de la tarifa eléctrica media o de referencia cada año



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad v

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

Régimen especial. Real Decreto 436/2004

Real Decreto 436/2004. Categorías

- Autoprodutores
- Energías renovables no consumibles, biomasa, biocarburantes
- Residuos con otra valoración energética
- Cogeneración tratamiento de residuos de sectores agrícola, ganadero y de servicios

Autoprodutores

Energías renovables no consumibles, biomasa, biocarburantes

Residuos con otra valoración energética

Cogeneración tratamiento de residuos de sectores agrícola, ganadero y de servicios



Estado energía eólica
A nivel internacional
A nivel español

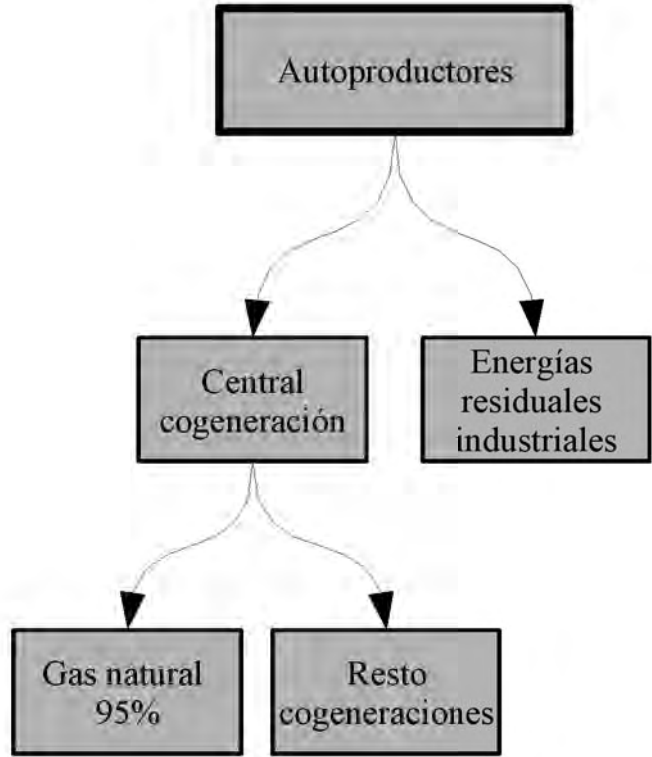
Régimen económico

Máq. eléct. rotativas
Introducción
Máq. asíncrona
Generador eólico
Aerogenerador a velocidad cte
M.A. Jaula
M.A. rotor b.
Aerogenerador a velocidad var
M.A. Jaula
M.A. rotor b.
M. síncrona

Régimen especial. Real Decreto 436/2004

Real Decreto 436/2004. Categorías

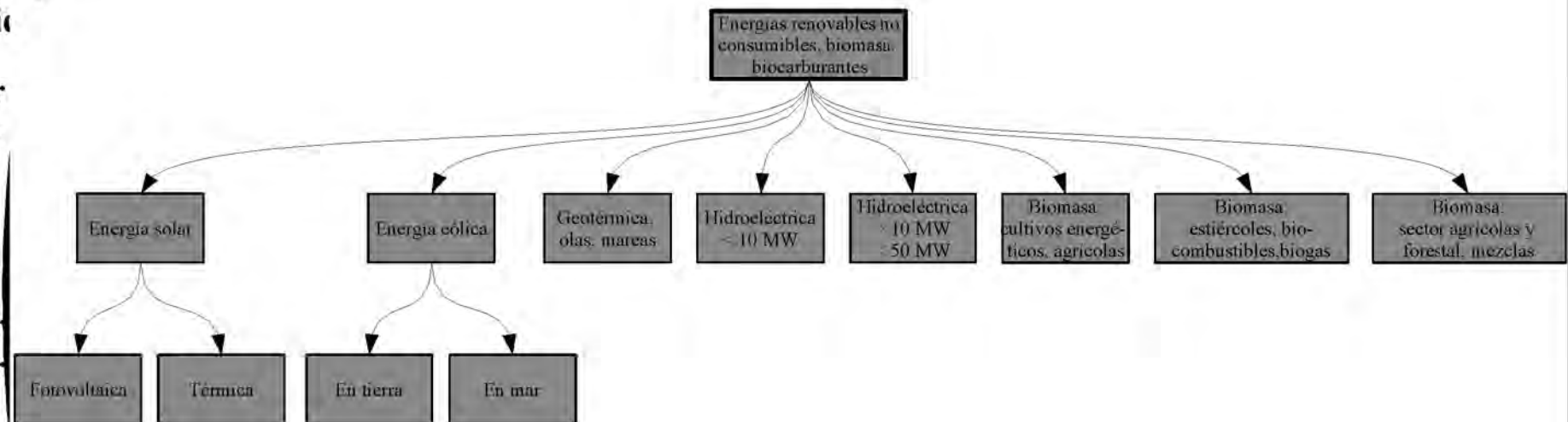
- **Autoprodutores**



Régimen especial. Real Decreto 436/2004

Real Decreto 436/2004. Categorías

- Energías renovables no consumibles, biomasa, biocarburantes



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

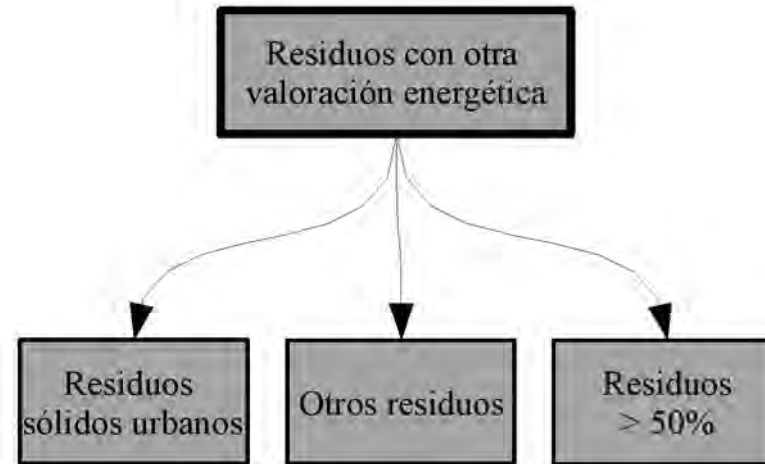
M.A. rotor b.

M. síncrona

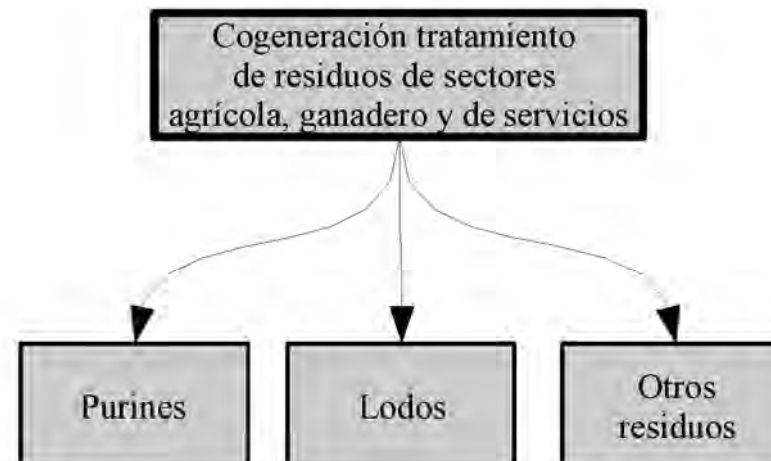
Régimen especial. Real Decreto 436/2004

Real Decreto 436/2004. Categorías

● Residuos con otra valoración energética



● Cogeneración tratamiento de residuos de sectores agrícola, ganadero y de servicios



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

Régimen especial. Real Decreto 436/2004

Real Decreto 436/2004. Tarifas, primas e incentivos por participar en el mercado

- **Instalaciones < 5 MW potencia instalada**
 - **Tarifa: 90% (primeros 15 años) y 80% (después)**
 - **Prima: 40%**
 - **Incentivo por participación en mercado: 10%**
- **Instalaciones > 5 MW potencia instalada**
 - **Tarifa: 90% (primeros 5 años), 85% (10 años siguientes) y 80% (después)**
 - **Prima: 40%**
 - **Incentivo por participación en mercado: 10%**
- **Además, se puede acceder a un complemento por energía reactiva, que se calcula como un porcentaje de la tarifa media o representativa**
- **Inconveniente: penalización en caso de desvíos respecto de las previsiones (debido al carácter aleatorio del viento)**



Máquinas eléctricas rotativas



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

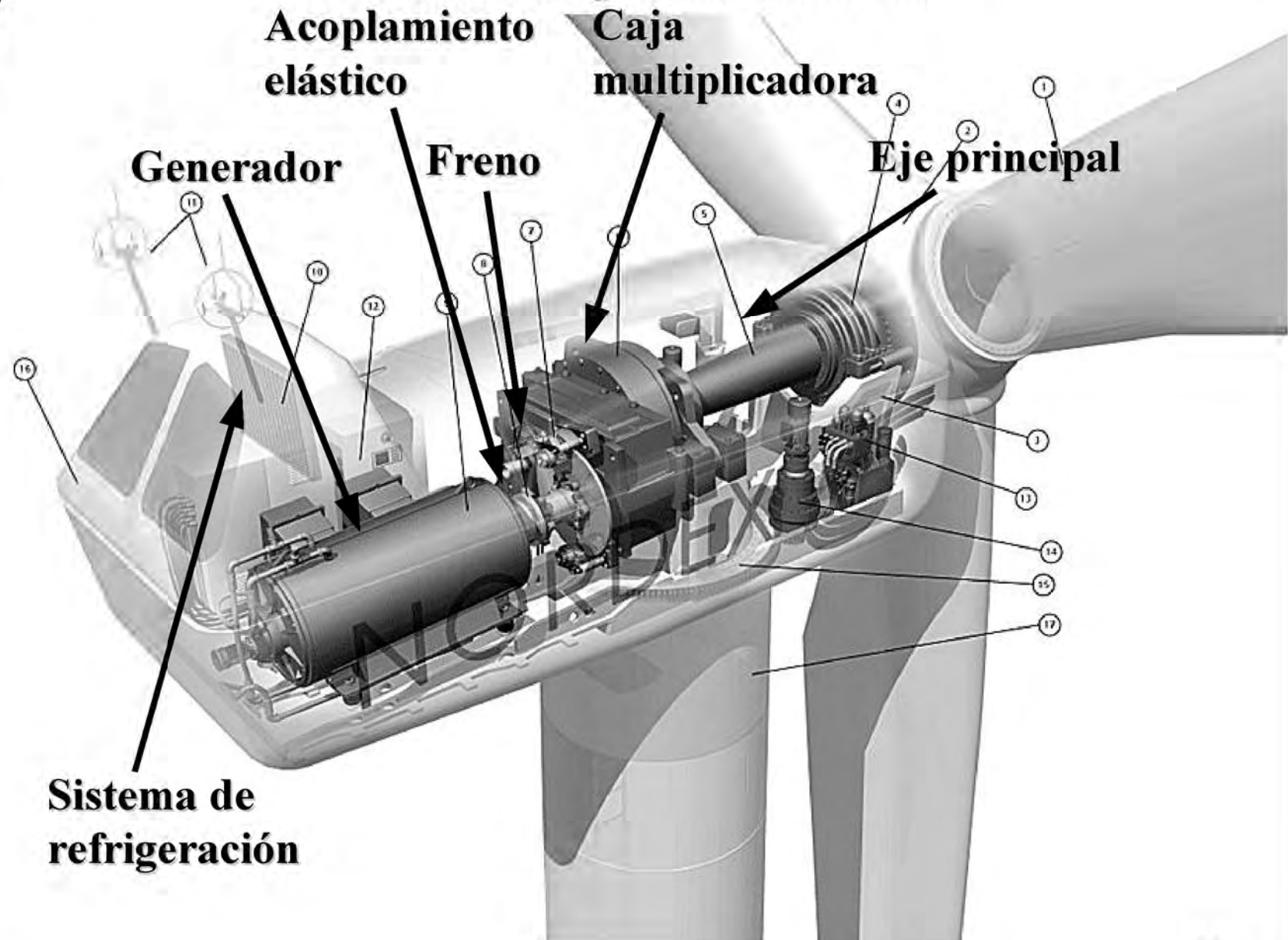
M.A. rotor b.

M. síncrona

Introducción

Estructura de un aerogenerador

Fuente: Aerogenerador Nortex N60



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

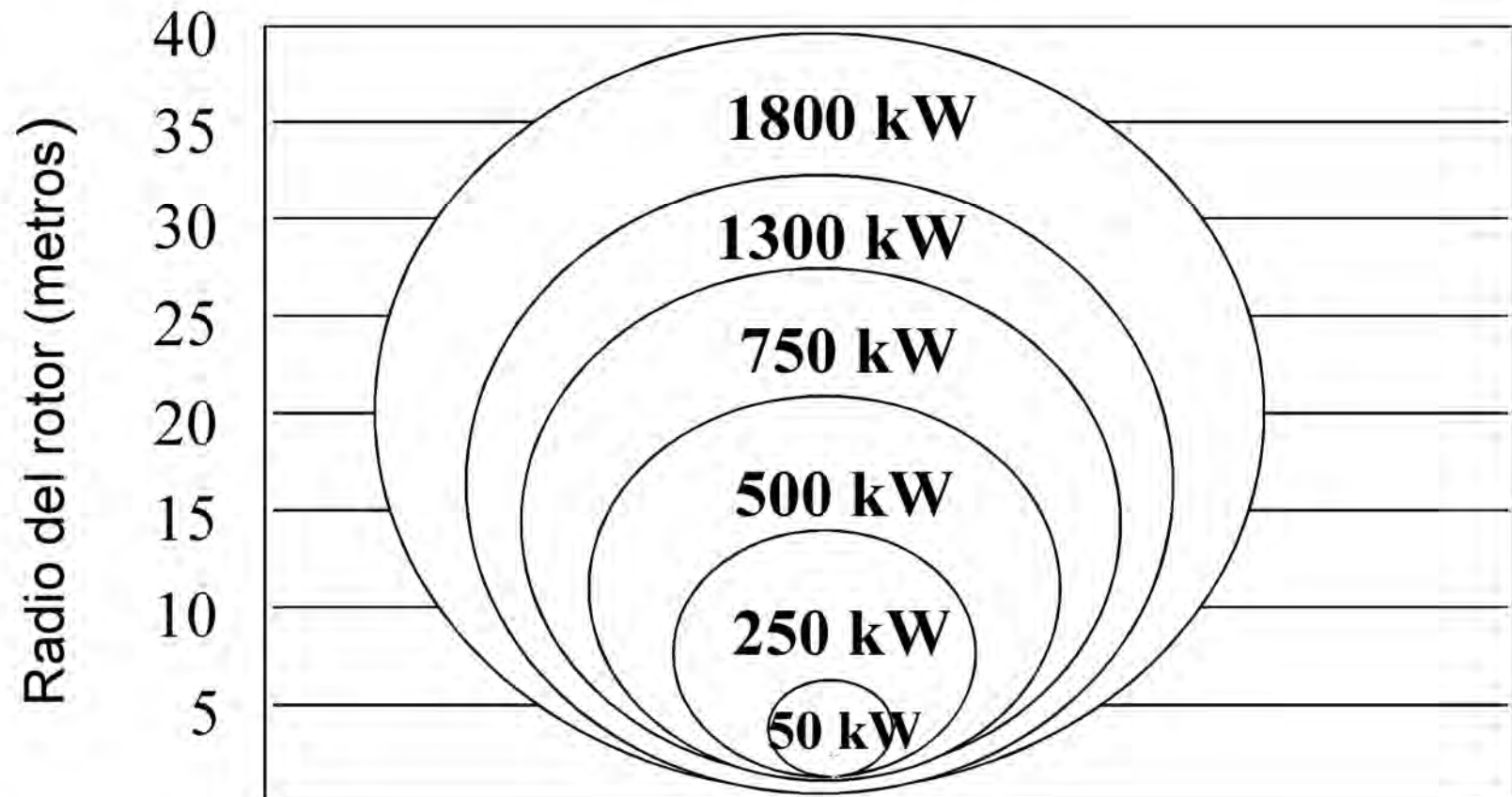
M.A. rotor b.

M. síncrona

Introducción

Potencia/dimensiones de aerogeneradores

Fuente: American Wind Energy Association (AWEA)



Introducción

Máquinas eléctricas utilizadas en aerogeneradores

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

- Máquina de corriente continua
- Máquina síncrona
- Máquina asíncrona
 - Rotor de jaula de ardilla / Dos devanados en el estator
 - Rotor bobinado / Máquina asíncrona doblemente alimentada



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

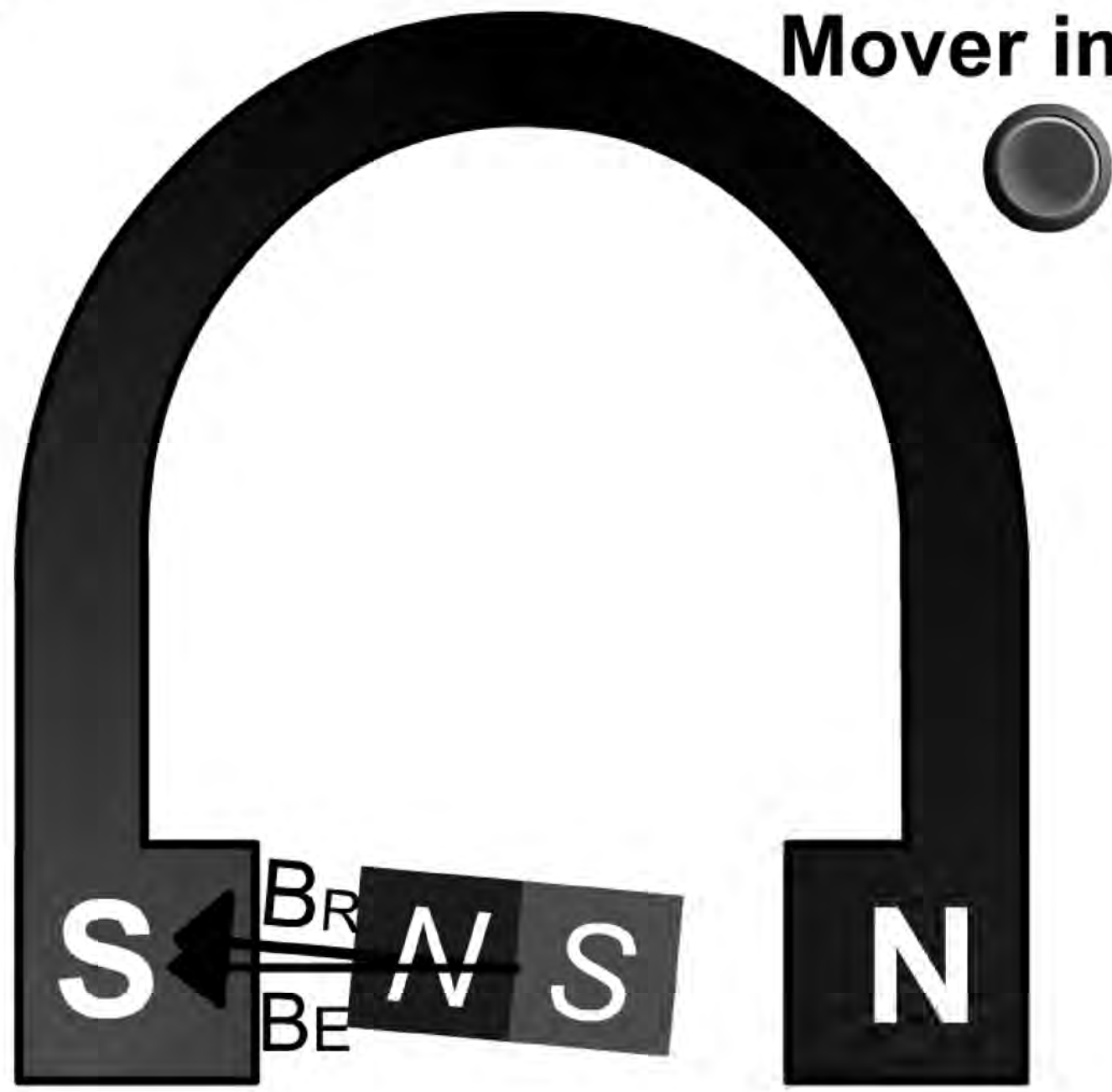
M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

Campo magnético giratorio

Mover imán



Campo magnético giratorio

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

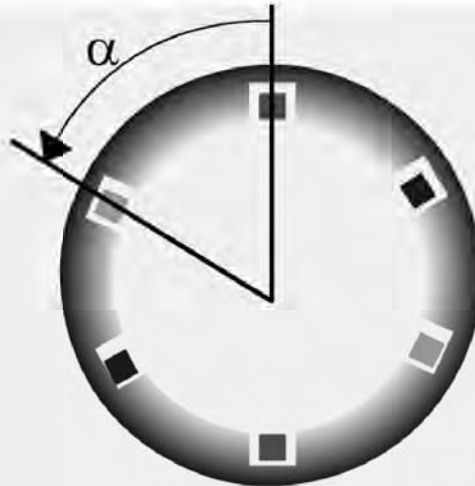
M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

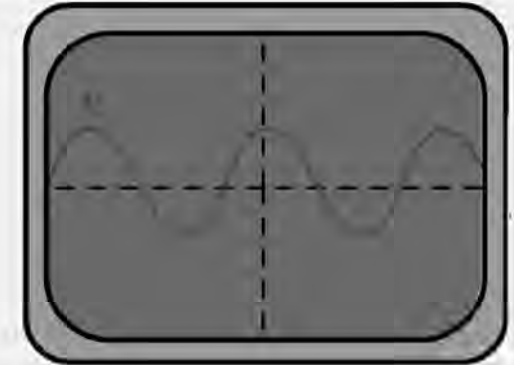
M.A. Jaula

M.A. rotor b.

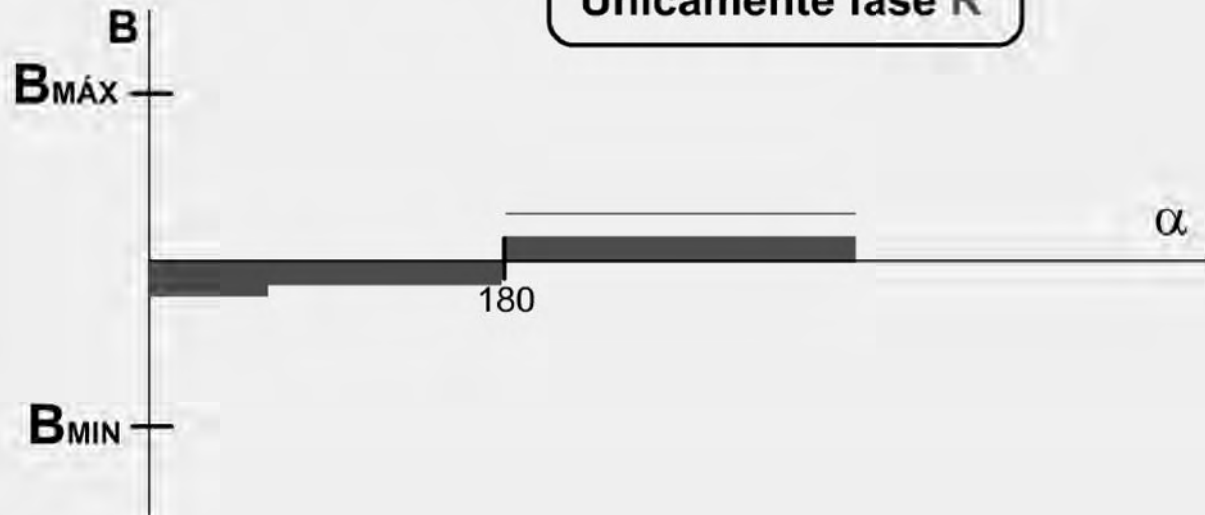
M. síncrona



- ➔ FASE R
- ➔ FASE S
- ➔ FASE T
- ➔ LAS TRES FASES



Únicamente fase R



Campo magnético giratorio

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

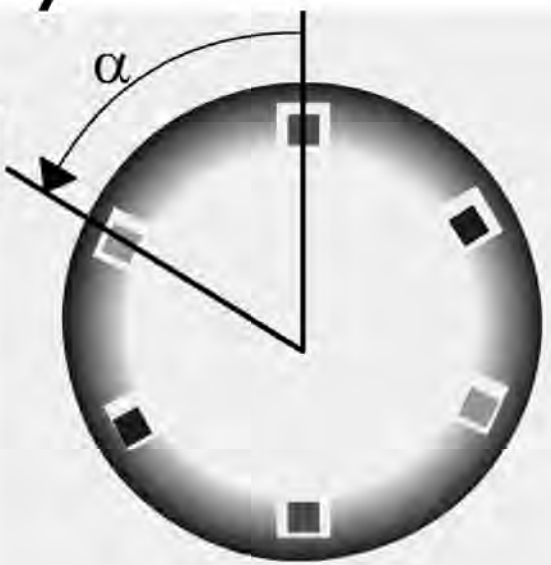
M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

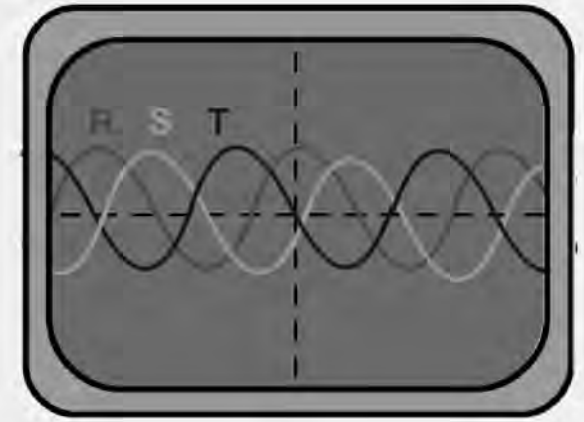
M.A. Jaula

M.A. rotor b.

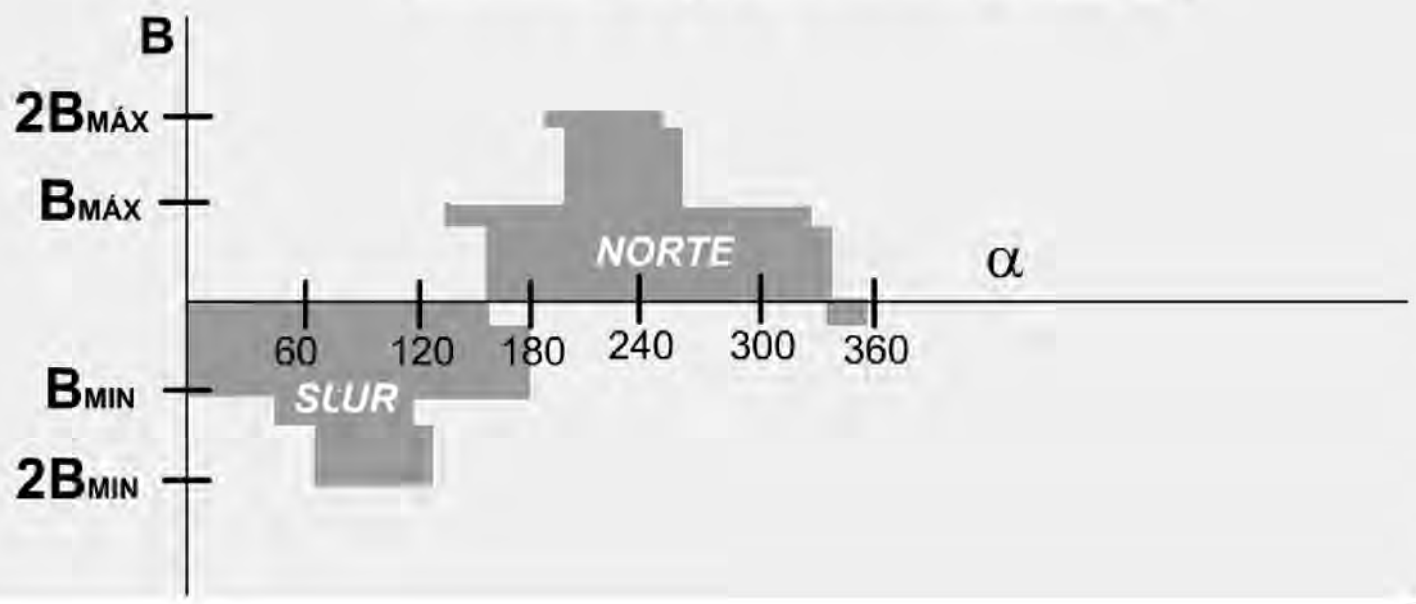
M. síncrona



- ➔ FASE R
- ➔ FASE S
- ➔ FASE T
- ➔ LAS TRES FASES



Fases R, S y T al mismo tiempo



Campo magnético giratorio

Estado energía eólica
A nivel internacional
A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

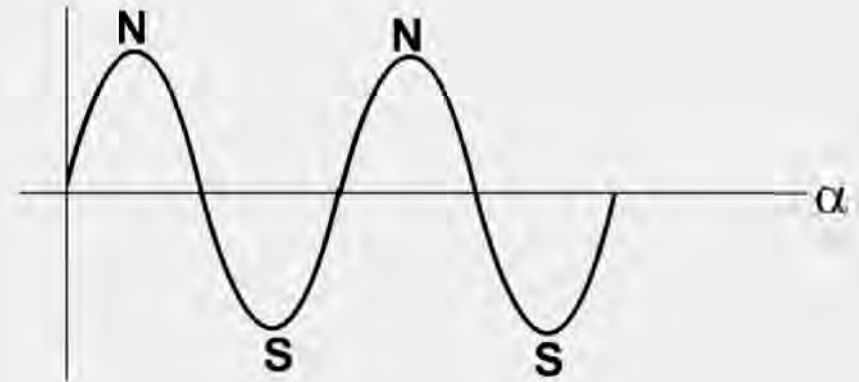
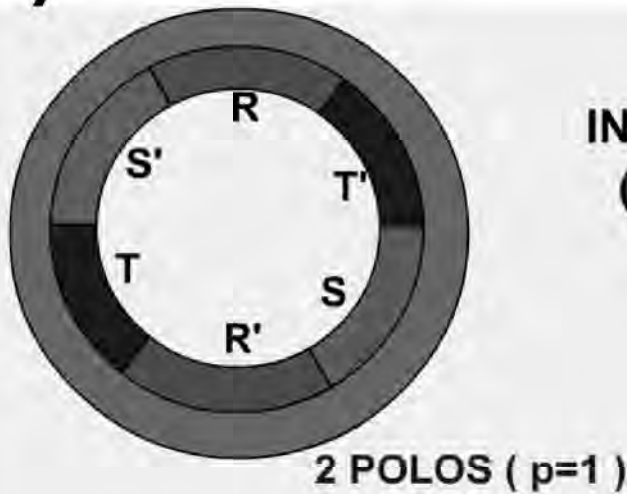
M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

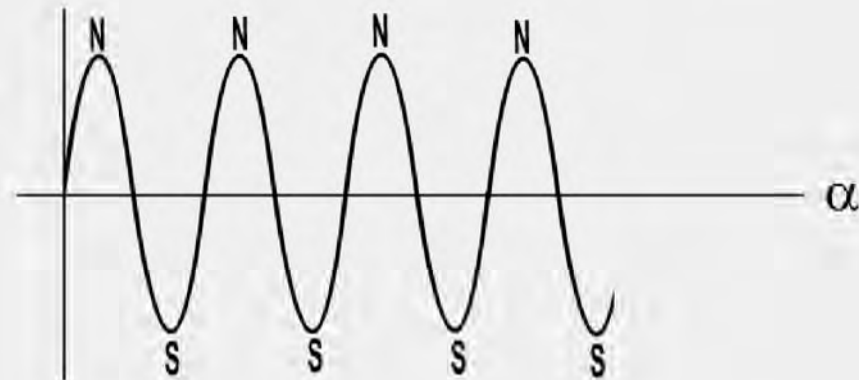
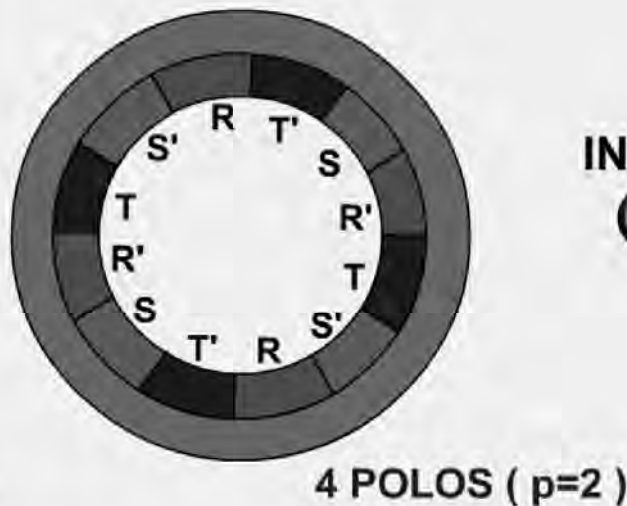
M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona



Si se desea incrementar el número de polos de la máquina, cada devanado se debe dividir tantas veces como pares de polos se deseen, la velocidad del campo magnético giratorio se reduce al aumentar el número de polos.



Características constructivas

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

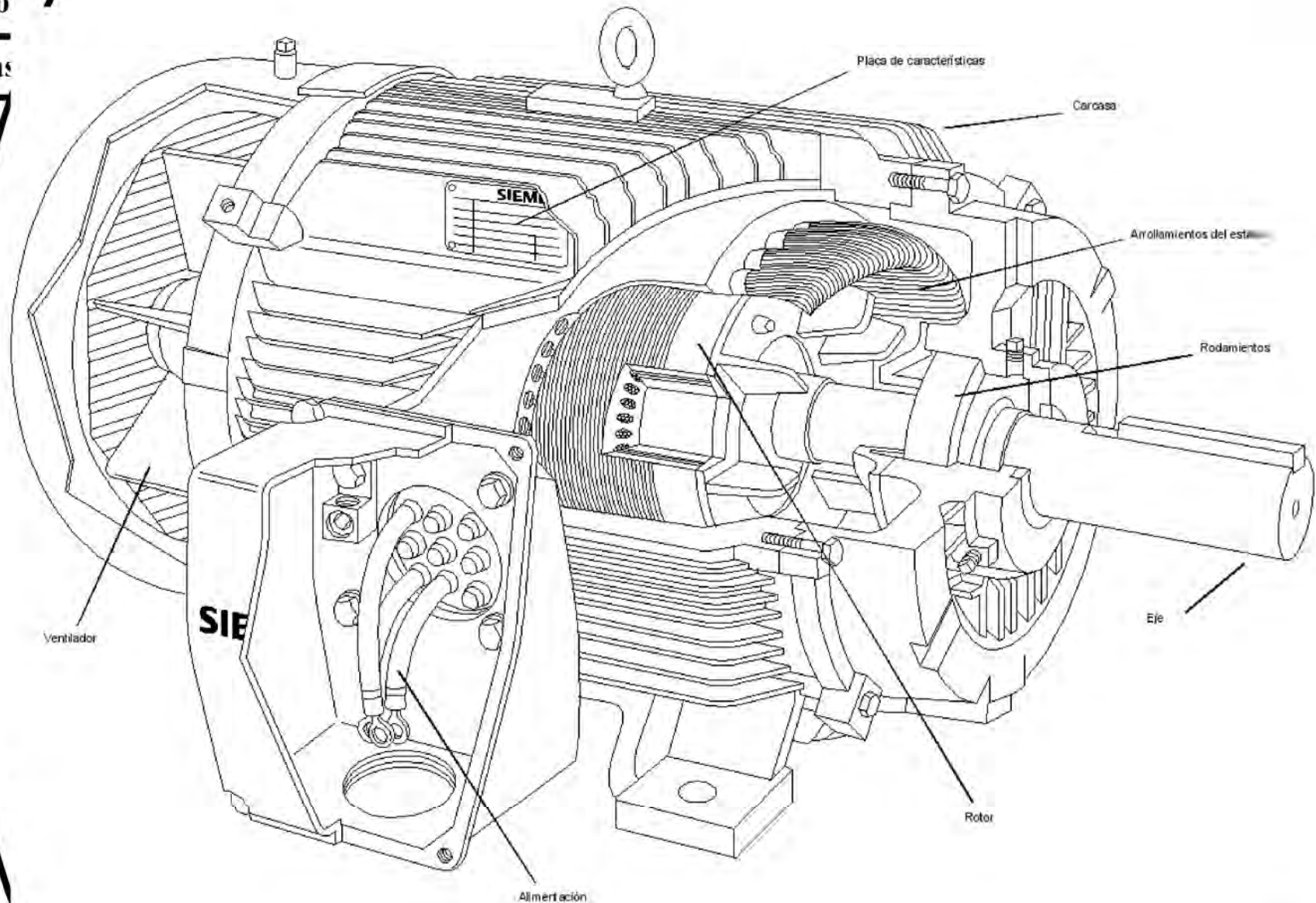
M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

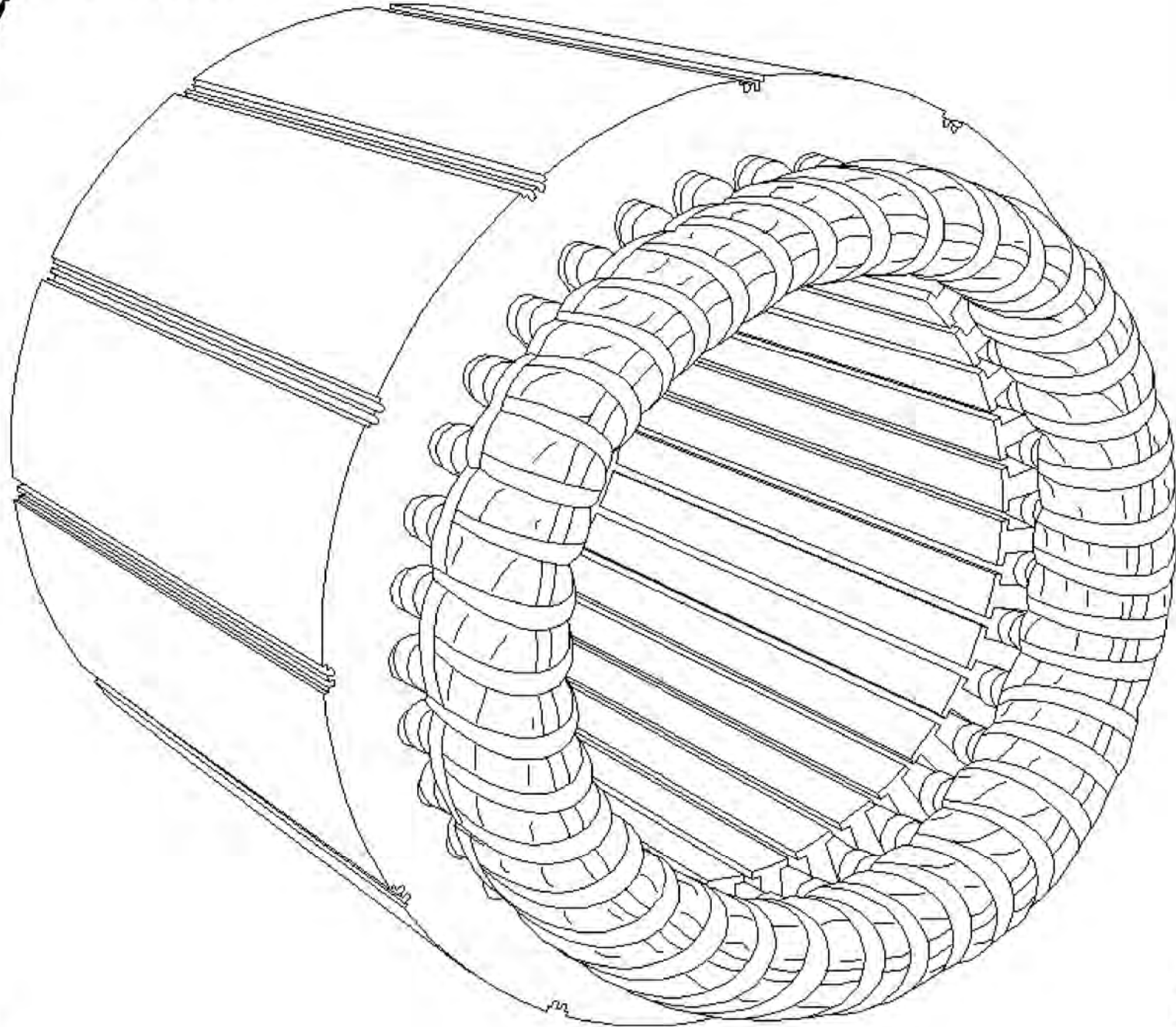
M.A. rotor b.

M. síncrona



Características constructivas

Estator



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

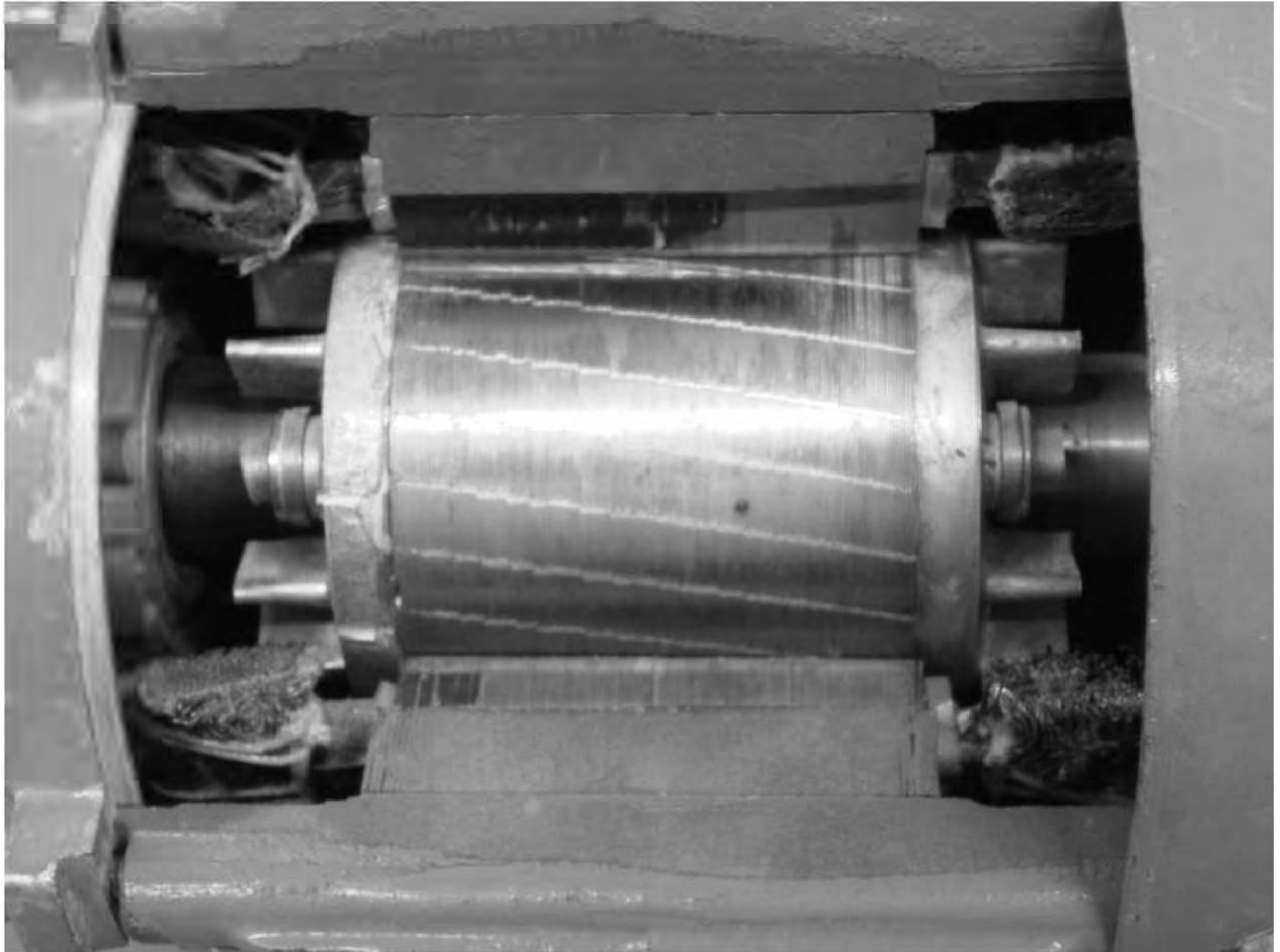
M. síncrona



Características constructivas

Rotor

- Jaula de ardilla



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

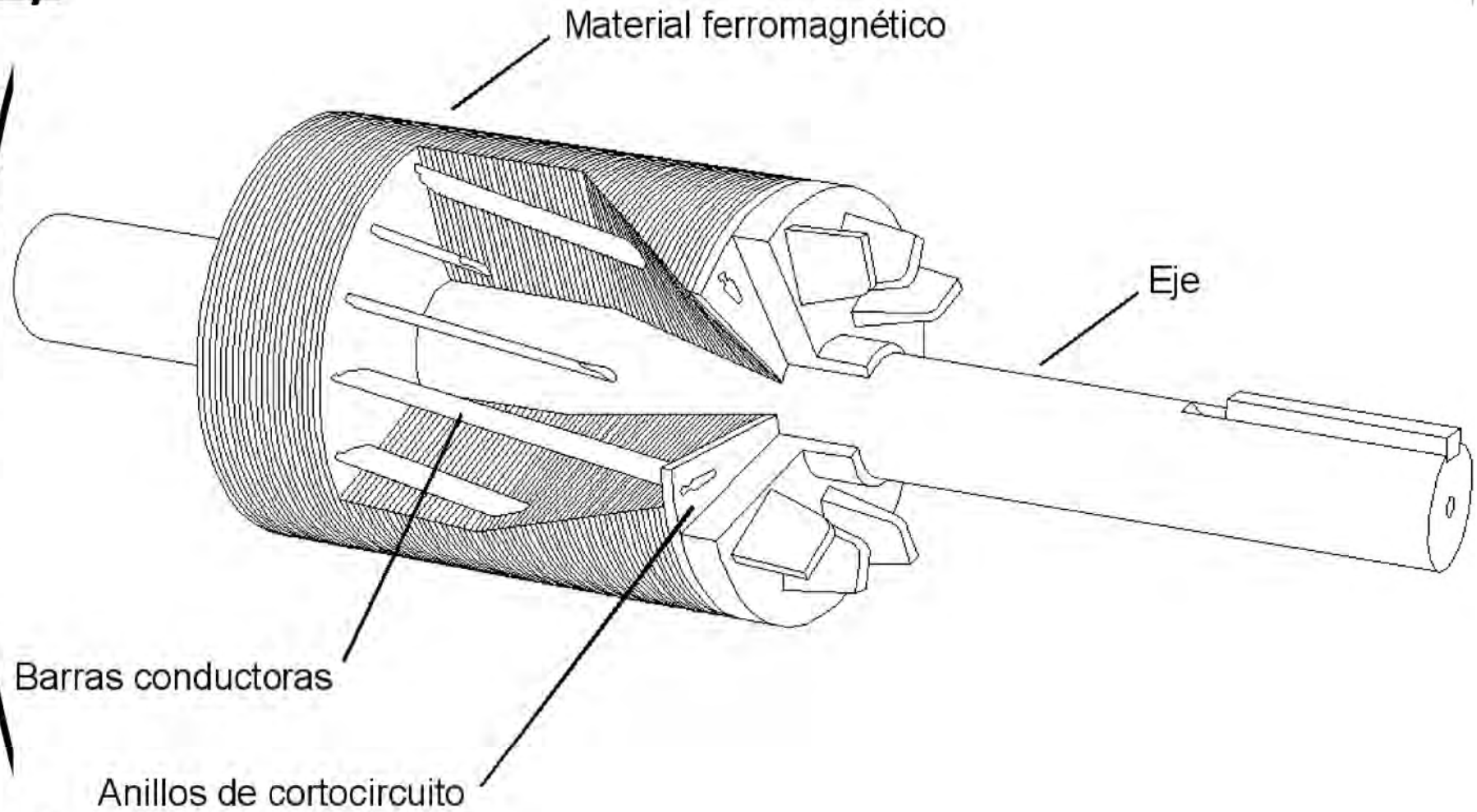
M. síncrona



Características constructivas

Rotor

- Jaula de ardilla



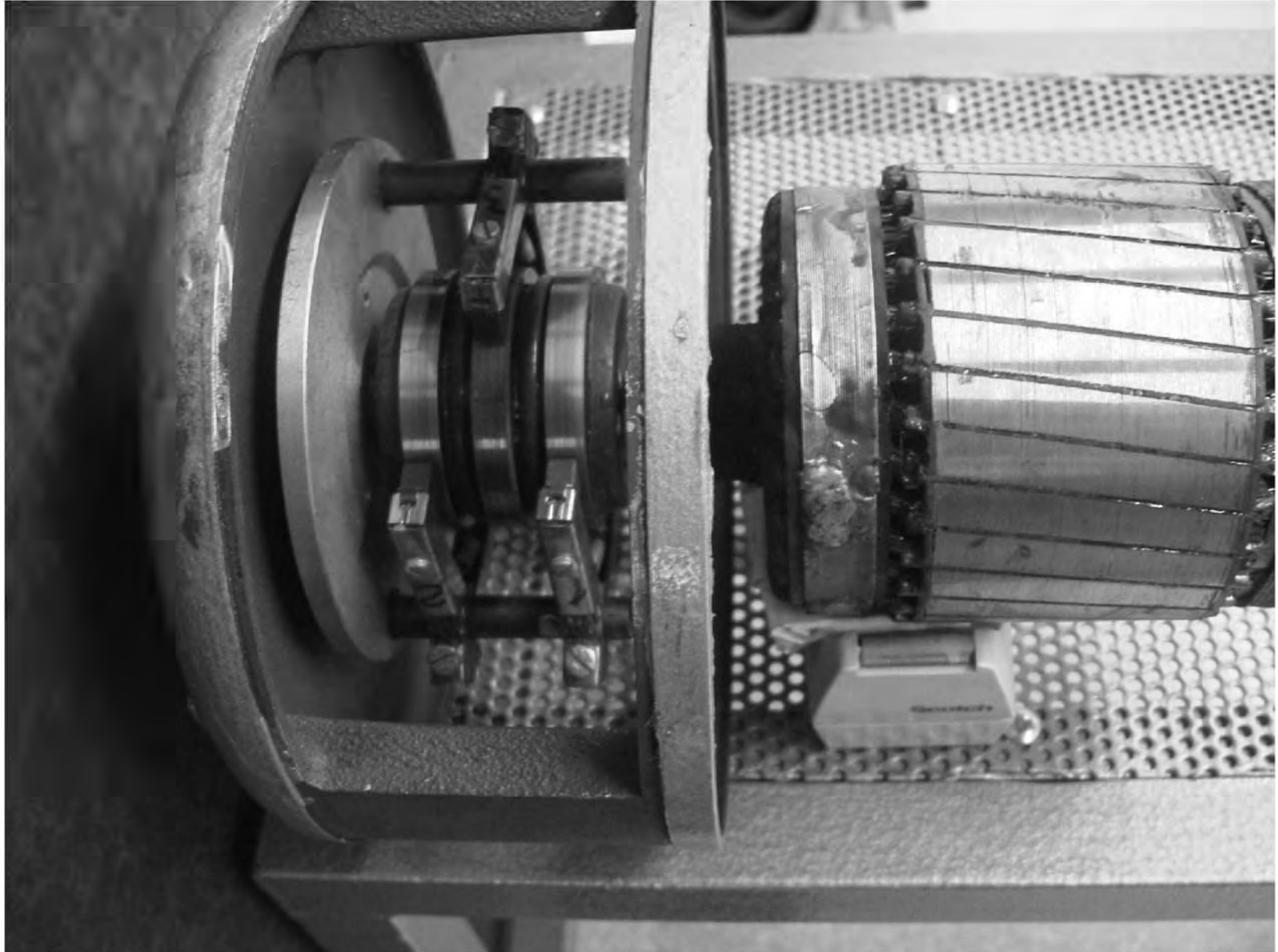
Estado energía eólica
A nivel internacional
A nivel español
Régimen económico
Máq. eléct. rotativas

Introducción
Máq. asíncrona
Generador eólico
Aerogenerador a velocidad cte
M.A. Jaula
M.A. rotor b.
Aerogenerador a velocidad var
M.A. Jaula
M.A. rotor b.
M. síncrona

Características constructivas

Rotor

- Bobinado



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

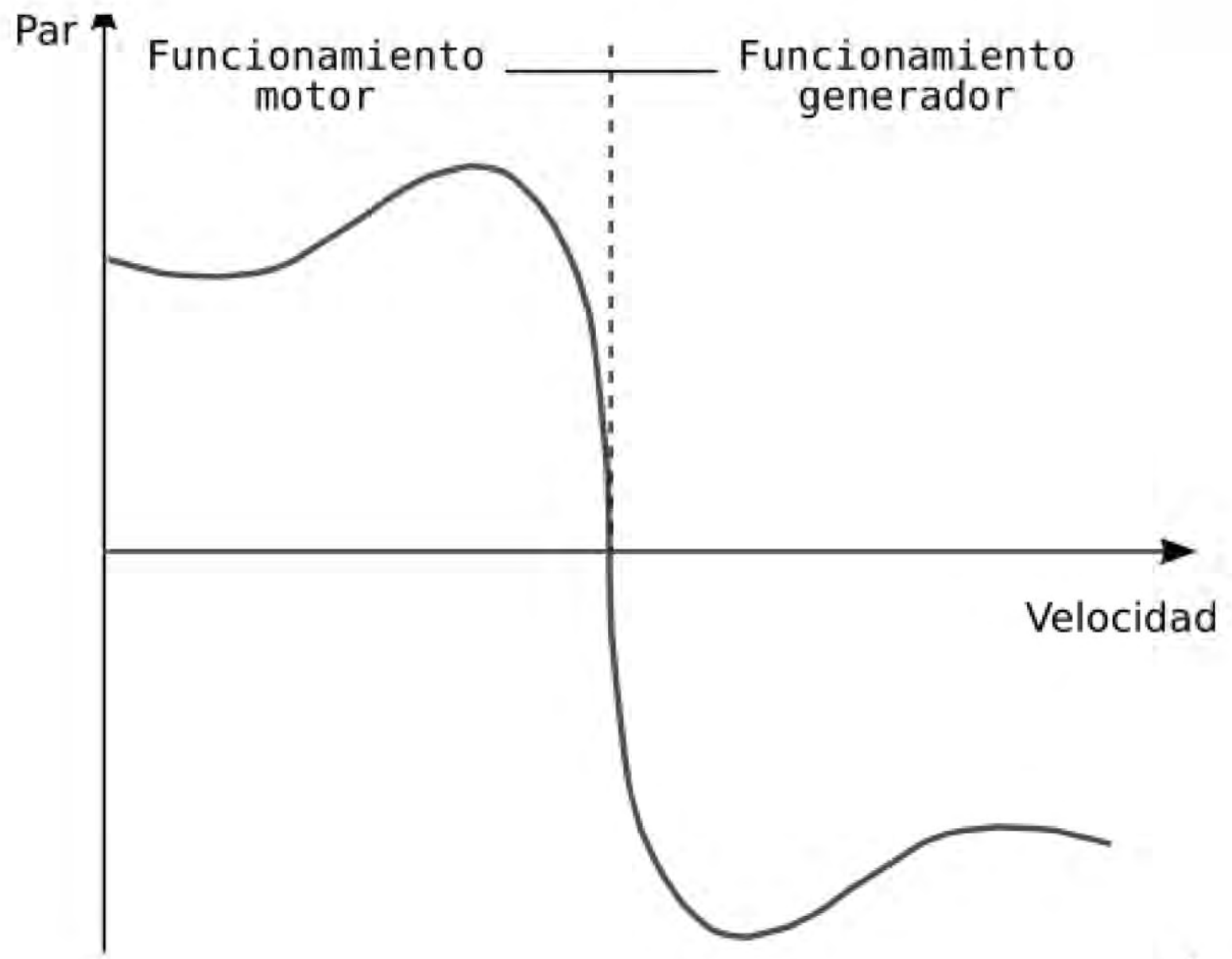
M. síncrona



- Estado energía eólica
- A nivel internacional
- A nivel español
- Régimen económico
- Máq. eléct. rotativas**
- Introducción
- Máq. asíncrona
- Generador eólico
- Aerogenerador a velocidad cte
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- Aerogenerador a velocidad var
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- M. síncrona

Modos de funcionamiento

Funcionamiento como motor y generador

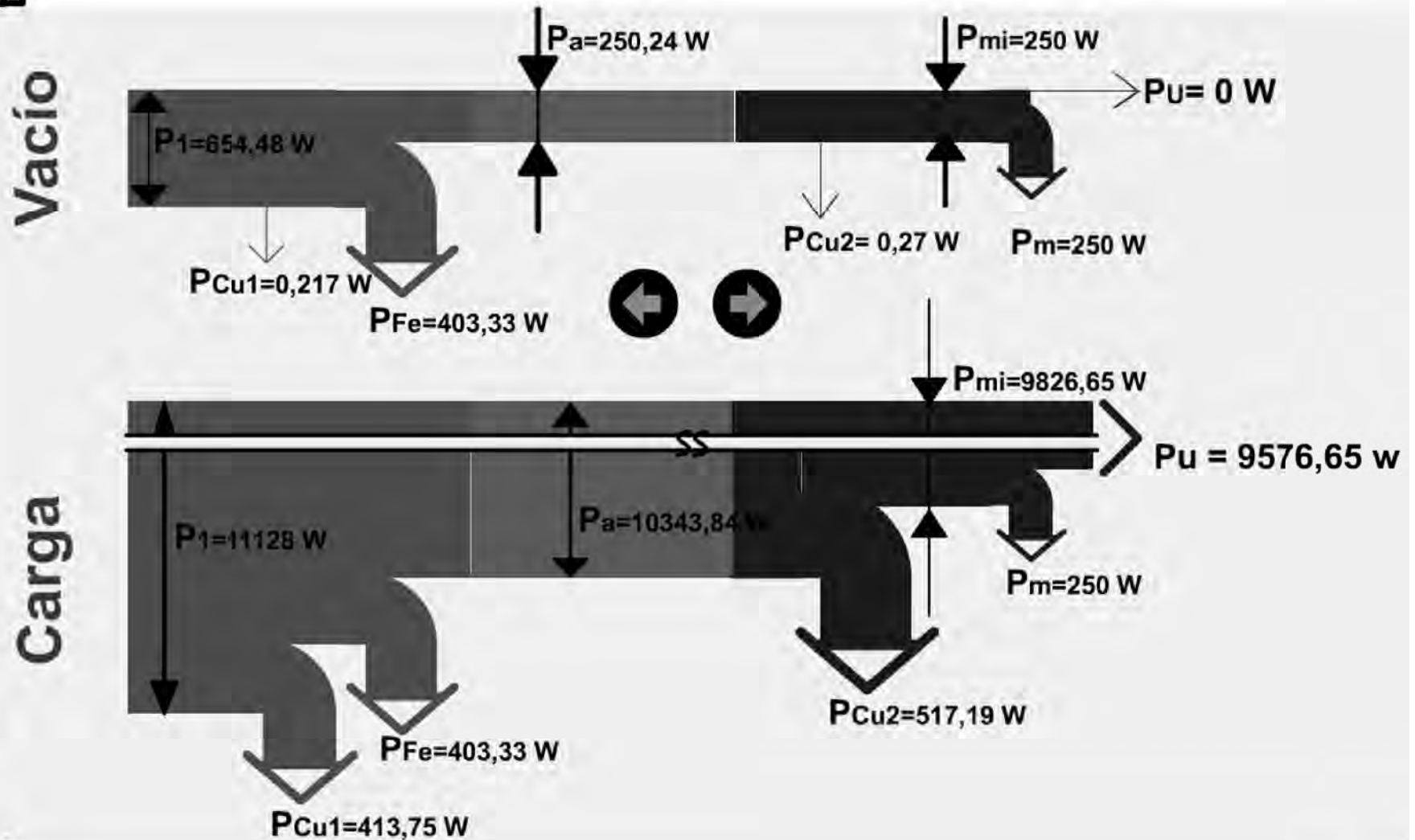


- Estado energía eólica
- A nivel internacional
- A nivel español
- Régimen económico
- Máq. eléct. rotativas**

Modos de funcionamiento

Balance de potencias (funcionamiento como motor)

- Introducción
- Máq. asíncrona**
- Generador eólico
- Aerogenerador a velocidad cte
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- Aerogenerador a velocidad var
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- M. síncrona



Estado energía eólica
A nivel internacional
A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción
Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

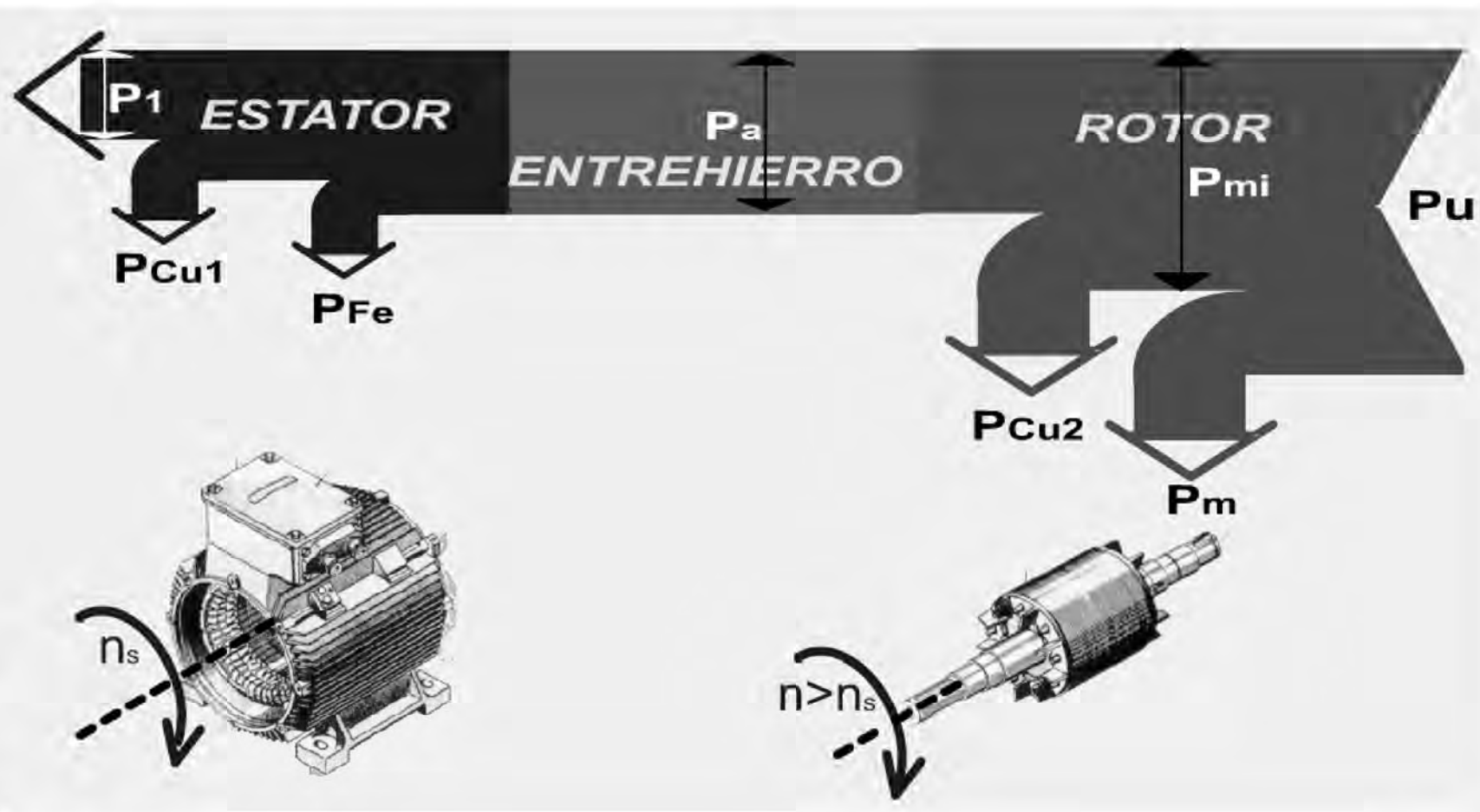
M.A. Jaula
M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula
M.A. rotor b.
M. síncrona

Modos de funcionamiento

Balance de potencias (funcionamiento como generador)



Empleo de las máquinas eléctricas como generadores eólicos



Empleo de máquinas eléctricas como generadores eólicos

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

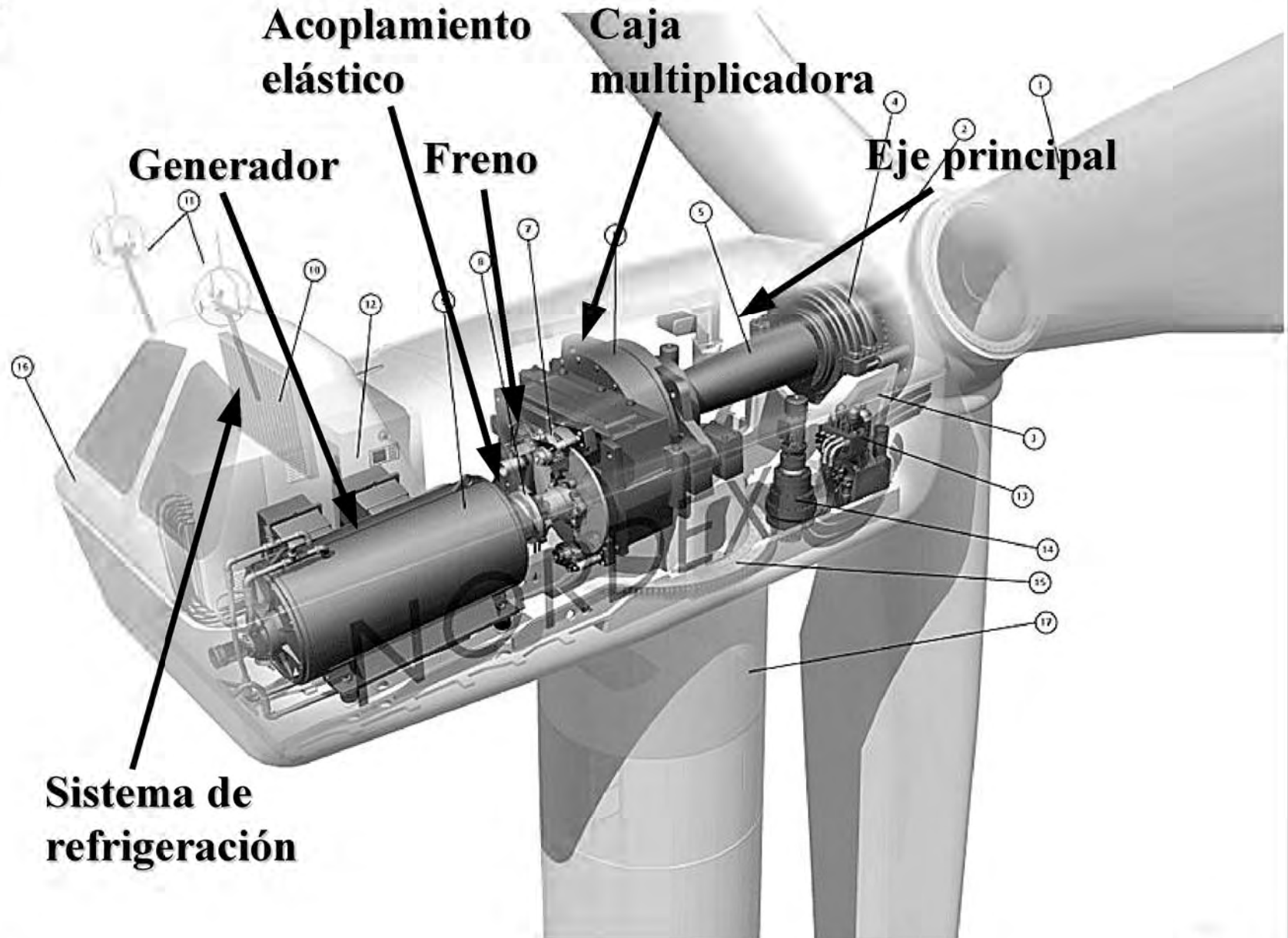
M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona



Empleo de máquinas eléctricas como generadores eólicos

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

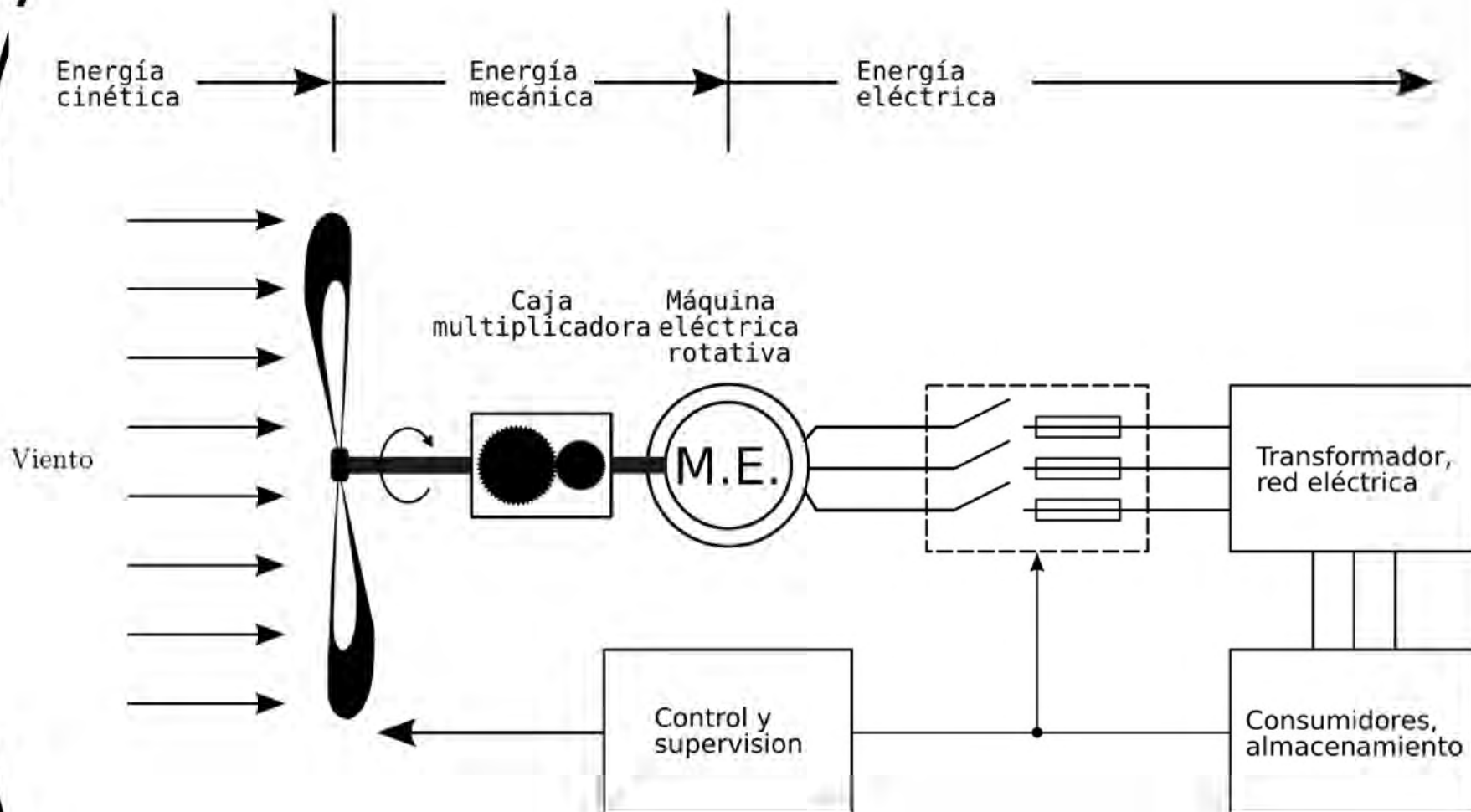
M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona



Empleo de máquinas eléctricas como generadores eólicos

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

- Entre los aerogeneradores instalados en España los más extendidos son:
 - Turbinas de velocidad fija con generador de inducción y control por entrada en pérdida
 - Turbinas de velocidad variable con máquina asíncrona doblemente alimentada
- Máquina de inducción doblemente alimentada:
 - El esquema básico consiste en conectar el estator a la red, e inyectar en el rotor corrientes trifásicas de amplitud, fase y frecuencia variable, mediante un convertidor electrónico conectado entre el rotor y la red



Empleo de máquinas eléctricas como generadores eólicos

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

● Sistemas de velocidad fija:

- Control por entrada en pérdida. El par mecánico disminuye a partir de una determinada velocidad del viento, con un diseño del perfil de la pala
- Control por variación del paso de la pala. El par mecánico es controlado por la modificación del ángulo de ataque de las palas. Control lento para limitar esfuerzos y fatigas
- Máquina asíncrona con deslizamiento del 0,6-1%

● Sistemas de velocidad variable:

- Permiten extraer más energía del viento por unidad de área
- Control de par. Partiendo de la velocidad de giro, se obtiene el par de la curva par-velocidad, que es tomado como referencia en el sistema de control
- Control de velocidad. Partiendo de la velocidad del viento medida como un anemómetro, se obtiene la velocidad de referencia



Empleo de máquinas eléctricas como generadores eólicos

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

- **Sistemas de velocidad fija:**
 - **Control por entrada en pérdida.** Simplicidad, peor aprovechamiento a vientos altos
 - **Control por variación del paso de la pala.** Mejor aprovechamiento a vientos altos, mayor coste y mayor mantenimiento
- **Sistemas de velocidad variable:**
 - **Menos ruido, mejor aprovechamiento a todas las velocidades del viento, control del factor de potencia, menos esfuerzos mecánicos, menor variación de la tensión**
 - **Sistema más complejo, pérdidas adicionales en el convertidor**



Empleo de máquinas eléctricas como generadores eólicos

- **Diferencias generales con otras aplicaciones:**
 - Máquina asíncrona de jaula de ardilla con dos devanados
 - Máquina asíncrona de rotor bobinado con control del deslizamiento
 - Máquinas asíncrona de rotor bobinado (Máquina asíncrona doblemente alimentada)
- **Por su especial ubicación:**
 - Tensiones reducidas (690V) lo que obliga a ubicar en góndola o mástil transformadores elevadores
 - Especiales características de refrigeración en góndola

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

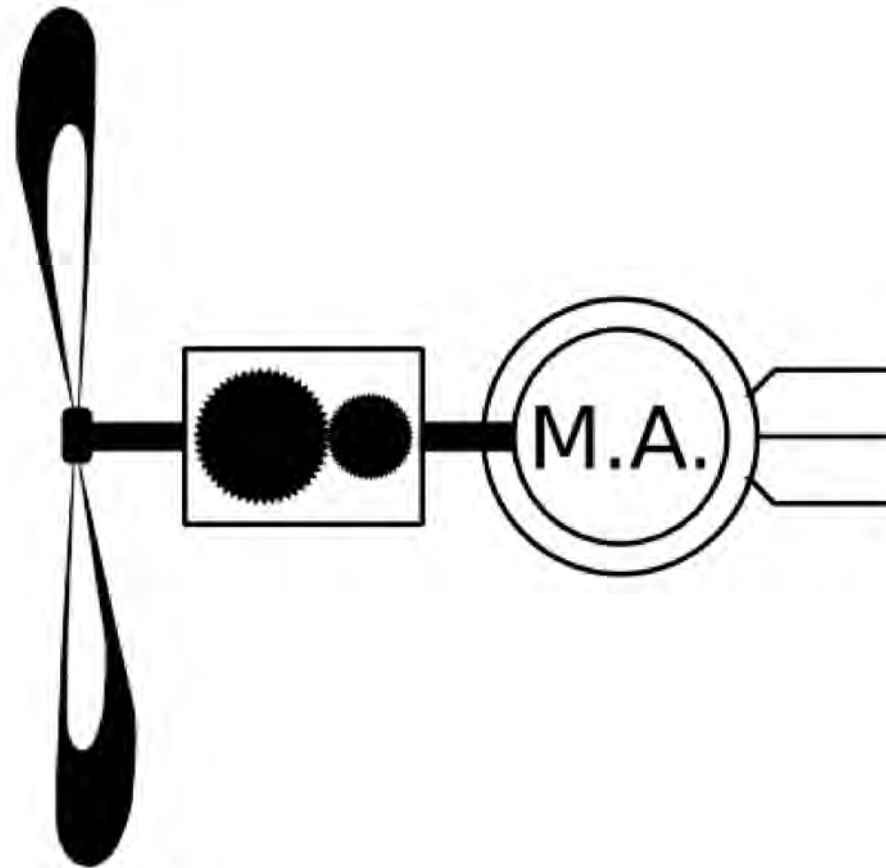


Aerogenerador a velocidad fija



Aerogeneradores a velocidad fija

Máquina asíncrona de jaula de ardilla



Estado energía eólica
A nivel internacional
A nivel español
Régimen económico
Máq. eléct. rotativas
Introducción
Máq. asíncrona
Generador eólico

Aerogenerador a velocidad cte

M.A. Jaula
M.A. rotor b.

Aerogenerador a velocidad var

M.A. Jaula
M.A. rotor b.
M. síncrona



Aerogeneradores a velocidad fija

Máquina asíncrona de jaula de ardilla

- La baja dinámica de la regulación mecánica lleva a variaciones en la potencia eléctrica y esfuerzos mecánicos ante ráfagas de viento
- Necesidad de materiales y estructuras adecuadas
- No es un método empleado en los aerogeneradores de mayor potencia (MW)

Estado energía eólica
A nivel internacional
A nivel español
Régimen económico
Máq. eléct. rotativas
Introducción
Máq. asíncrona
Generador eólico

**Aerogenerador
a velocidad cte**

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona



Aerogeneradores a velocidad fija

Máquina asíncrona de rotor bobinado

- Es una solución de compromiso entre el funcionamiento con velocidad fija y velocidad variable
- Consiste esencialmente en una máquina de inducción de rotor bobinado con una resistencia en serie con el rotor, controlada por un semiconductor de potencia
- Funciona como un sistema de velocidad fija excepto a baja velocidad donde el valor de la resistencia controla el deslizamiento. Rango típico de variación de velocidad 10%
- Este sistema no permite el control del factor de potencia
- Pueden eliminarse los anillos rozantes montando la resistencia y la electrónica de potencia con el eje, sistema que puede presentar problemas de refrigeración. El control de la electrónica en este caso se realiza de forma óptica

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

**Aerogenerador
a velocidad cte**

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

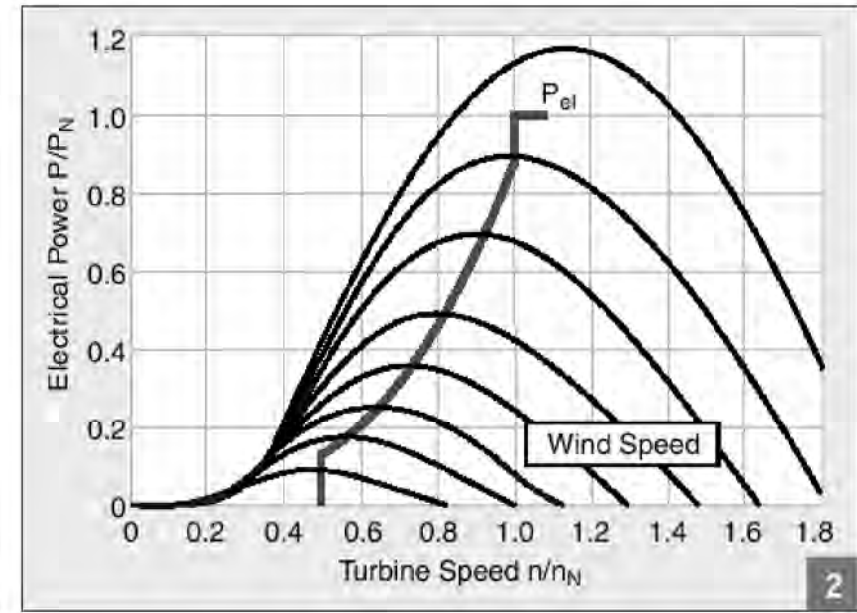
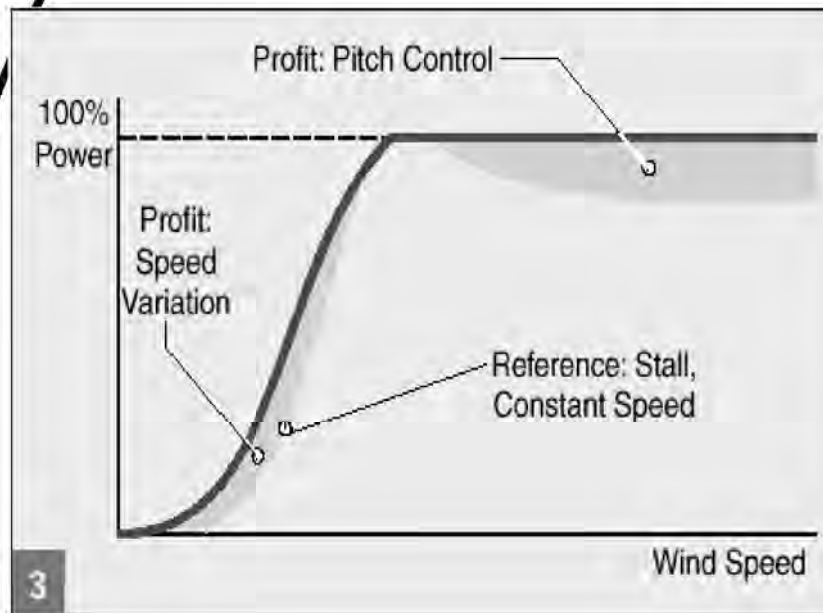


Aerogenerador a velocidad variable



Aerogeneradores a velocidad variable

Sistemas de velocidad variable



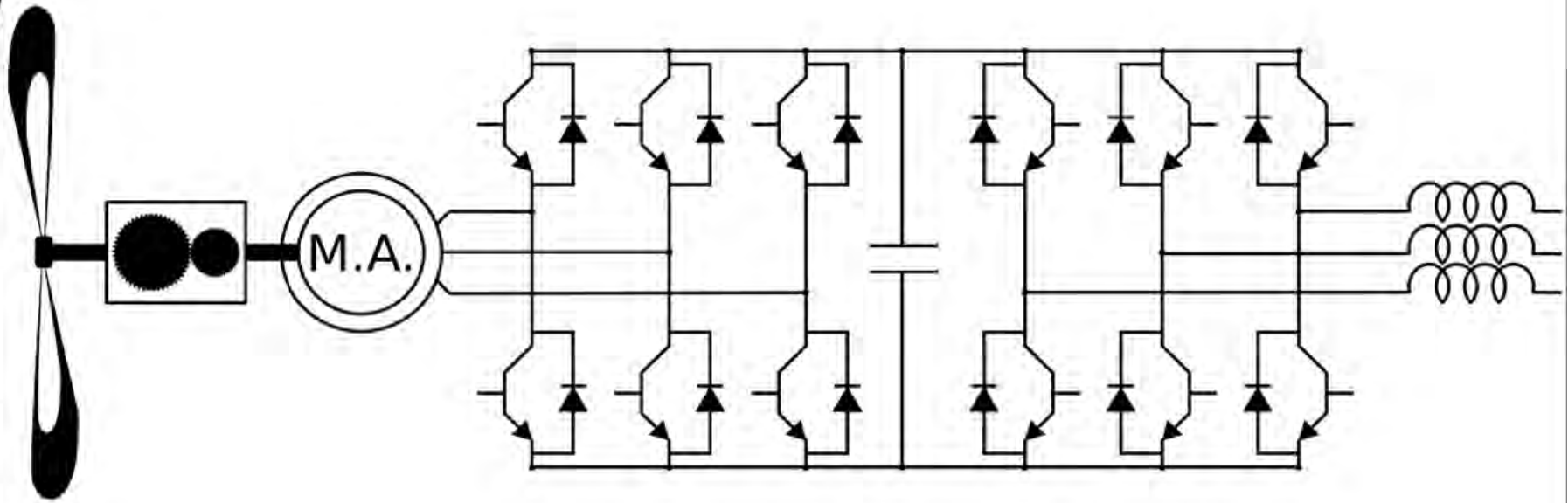
- La velocidad de la turbina es función de la velocidad del viento para maximizar la potencia obtenida
- El control de paso de la pala se utiliza únicamente a altas velocidades del viento para limitar la potencia máxima
- Cuando la velocidad del viento es muy elevada se procede a la desconexión del generador de la red



Aerogeneradores a velocidad variable

Máquina asíncrona de jaula de ardilla

- Estado energía eólica
- A nivel internacional
- A nivel español
- Régimen económico
- Máq. eléct. rotativas
- Introducción
- Máq. asíncrona
- Generador eólico
- Aerogenerador a velocidad cte
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- Aerogenerador a velocidad var**
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- M. síncrona



Aerogeneradores a velocidad variable

Máquina asíncrona de jaula de ardilla

Ventajas

- El generador produce potencia eléctrica a frecuencia variable
- El convertidor electrónico permite obtener una frecuencia fija (rectificadores no controlados, diodos)
- Se utilizan convertidores PWM que permiten funcionamiento en los cuatro cuadrantes
- No hay límites máximos o mínimos en velocidad de la turbina
- Es posible el control de la potencia reactiva

Inconvenientes

- Son necesarios dos convertidores en serie con la potencia total
- Pueden aparecer en los arrollamientos sobretensiones
- Pérdidas de hasta el 3% de la potencia generada
- Son necesarias grandes baterías de condensadores
- Las inductancias de línea están alrededor del 12-15% de la potencia generada

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

Aerogenerador
a velocidad var

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

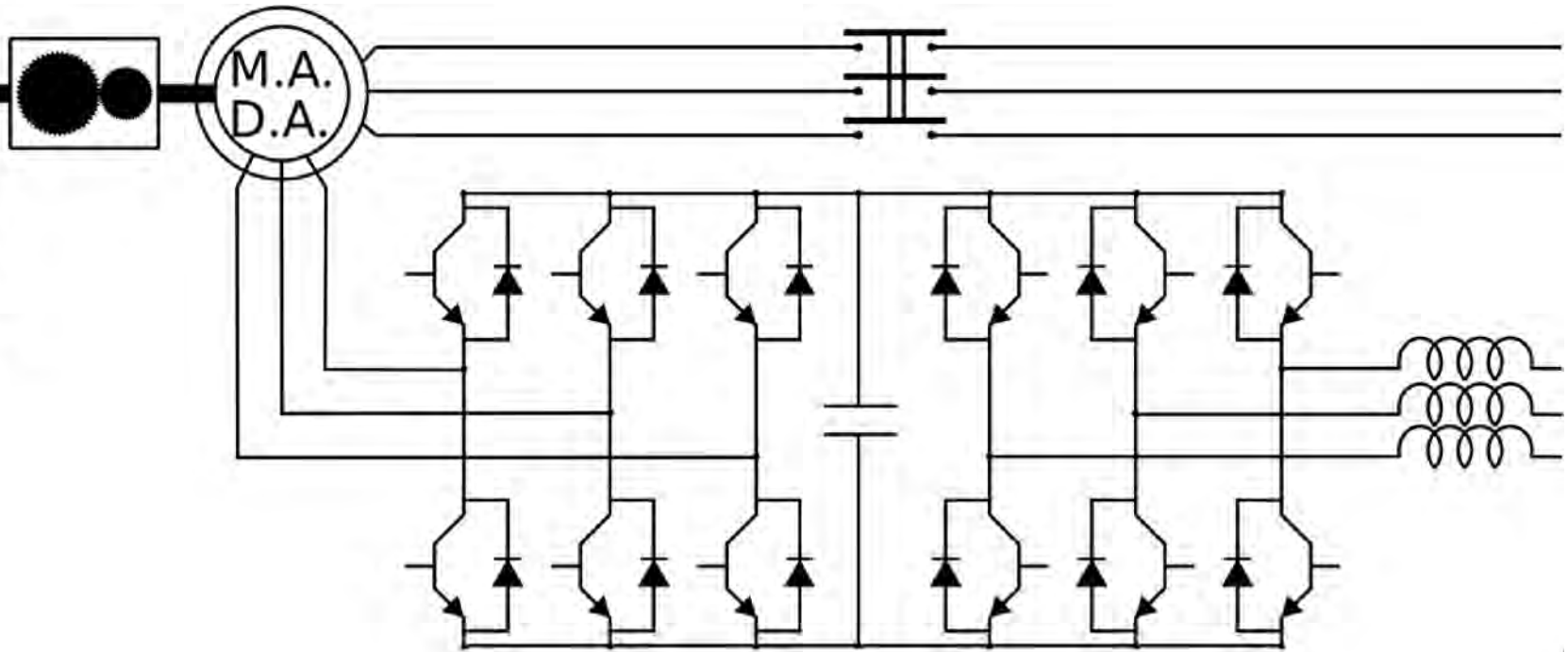
M. síncrona



Aerogeneradores a velocidad variable

Máquina asíncrona doblemente alimentada

- Estado energía eólica
- A nivel internacional
- A nivel español
- Régimen económico
- Máq. eléct. rotativas
- Introducción
- Máq. asíncrona
- Generador eólico
- Aerogenerador a velocidad cte
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- Aerogenerador a velocidad var**
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- M. síncrona



Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

**Aerogenerador
a velocidad var**

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

Aerogeneradores a velocidad variable

Máquina asíncrona doblemente alimentada

Ventajas

- Es necesario un convertidor electrónico entre el rotor y la red
 - Al principio cicloconvertidores
 - Actualmente convertidores similares a los anteriores
- La potencia del convertidor electrónico es típicamente del 25% de la potencia de la máquina de inducción
- El filtro está diseñado para una potencia del 25% también
- Es posible obtener $FP=1$, y un funcionamiento parecido al de la máquina síncrona

Inconvenientes

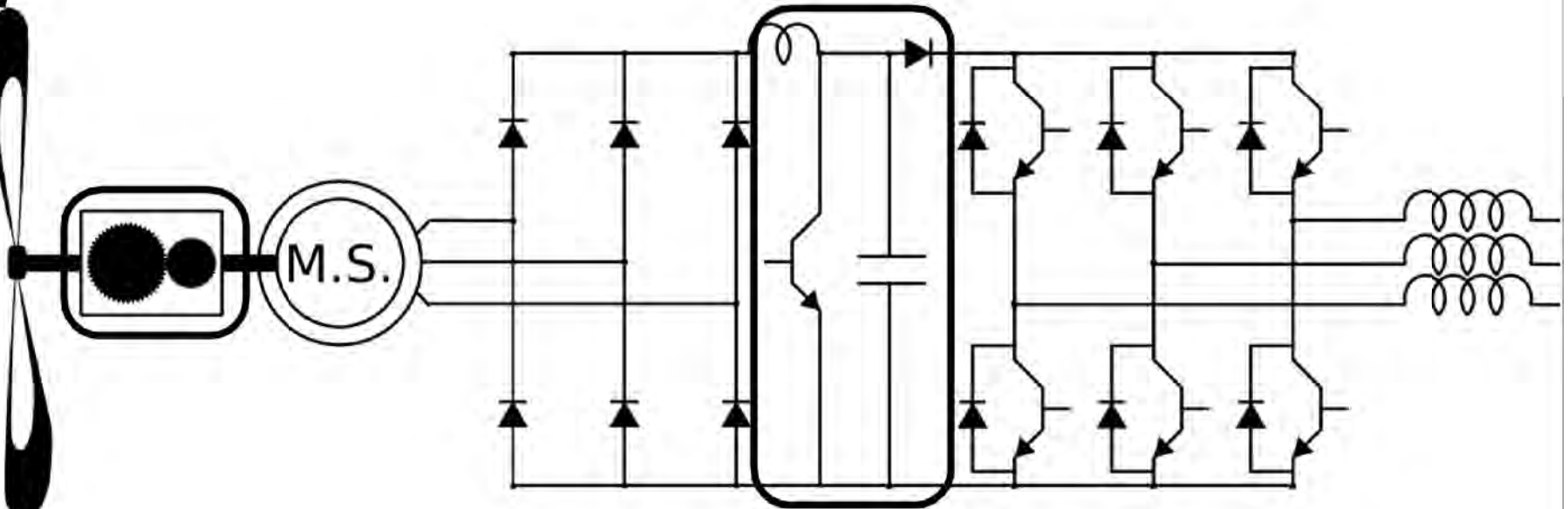
- Utiliza una máquina asíncrona de rotor bobinado, problemas de mantenimiento
- Límites mínimos y máximos de velocidad de turbina (75-125%)



Aerogeneradores a velocidad variable

Máquina síncrona

- Estado energía eólica
- A nivel internacional
- A nivel español
- Régimen económico
- Máq. eléct. rotativas
- Introducción
- Máq. asíncrona
- Generador eólico
- Aerogenerador a velocidad cte
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- Aerogenerador a velocidad var**
- M.A. Jaula
- M.A. rotor b.
- M. síncrona



Aerogeneradores a velocidad variable

Máquina síncrona

Ventajas

- No hay límites máximos ni mínimos en la velocidad de la turbina
- La potencia generada y la tensión se incrementa con velocidad
- Es posible el control de potencia reactiva
- El control del convertidor es relativamente sencillo
- En sistemas sin caja multiplicadora se reduce el peso de la góndola, el impacto acústico y las vibraciones, así como un menor mantenimiento

Inconvenientes

- Dos o tres convertidores del total de la potencia en serie
- Pérdidas de hasta el 2-3% de la potencia generada
- Son necesarios grandes condensadores
- Inductancia del 10-15% de la potencia generada

Estado energía eólica

A nivel internacional

A nivel español

Régimen económico

Máq. eléct. rotativas

Introducción

Máq. asíncrona

Generador eólico

Aerogenerador
a velocidad cte

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

**Aerogenerador
a velocidad var**

M.A. Jaula

M.A. rotor b.

M. síncrona

