

# Seminario Nacional CIGRE Colombia

Máquinas Eléctricas Rotativas 2022

## Desarrollo de las Tecnologías de Motores de Alta Eficiencia

Enrique C. Quispe, Dr. Ing.

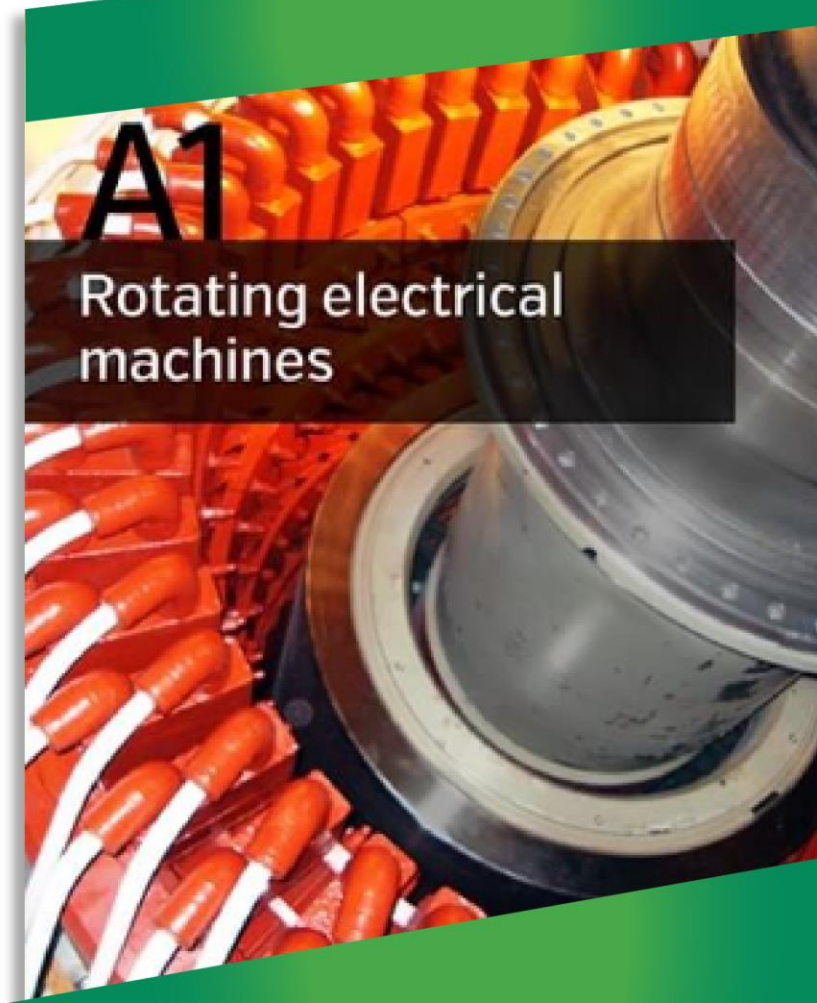
Universidad Autónoma de Occidente

Grupo de Trabajo **WGA1.1 CIGRE** - Colombia

Organizan:



Apoya:



## 2. Naturaleza del Par Electromagnético en los Motores Eléctricos



1. Importancia de los Motores eléctricos en la Transición Energética
2. Eficiencia y Pérdidas en Motores eléctricos
3. Desarrollo de la Tecnología de motores de alta eficiencia
4. Conclusiones

# 1. Importancia de los Motores Eléctricos en la Transición Energética



Componentes de un sistema motor eléctrico

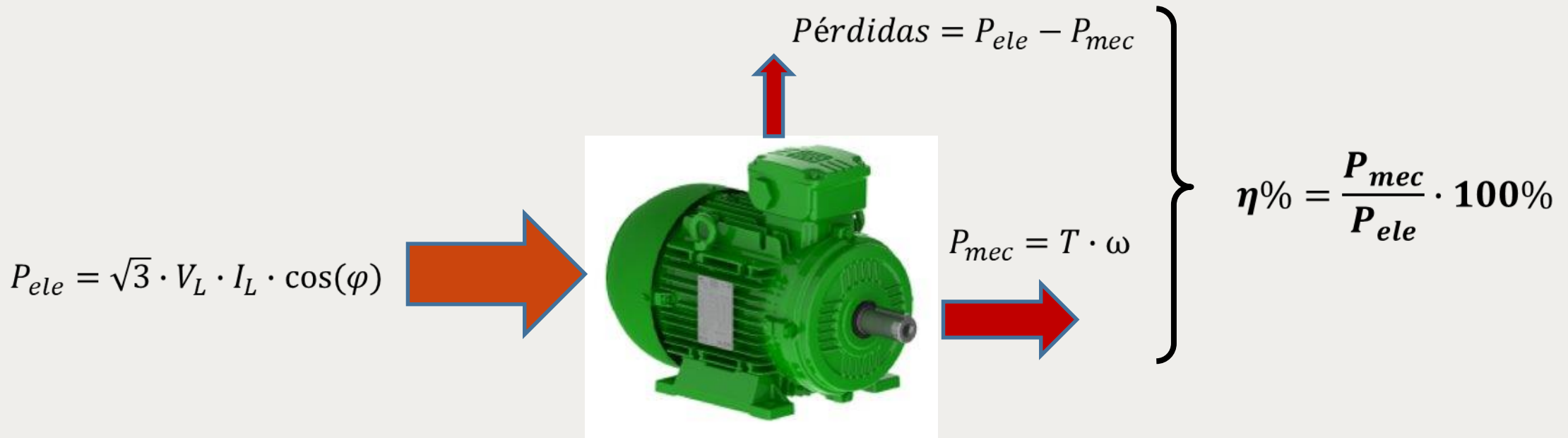


Los sistemas motores eléctricos consumen el 53% de la electricidad mundial (10,700TWh)

Los sistemas motores eléctricos son responsables de la emisión de 5.5 GtonCO<sub>2</sub>eq.

## 2. Eficiencia y Pérdidas en Motores Eléctricos

$$EF = \frac{\text{Pot. salida}}{\text{Pot. entrada}} = \frac{\text{Pot. entrada} - \text{Pérd.}}{\text{Pot. entrada}} = \frac{\text{Pot. salida.}}{\text{Pot. salida} + \text{Pérd.}}$$



**La eficiencia nominal del motor aumenta si disminuyen sus pérdidas nominales.**

### **3. Desarrollo de la tecnología de Motores de alta eficiencia**



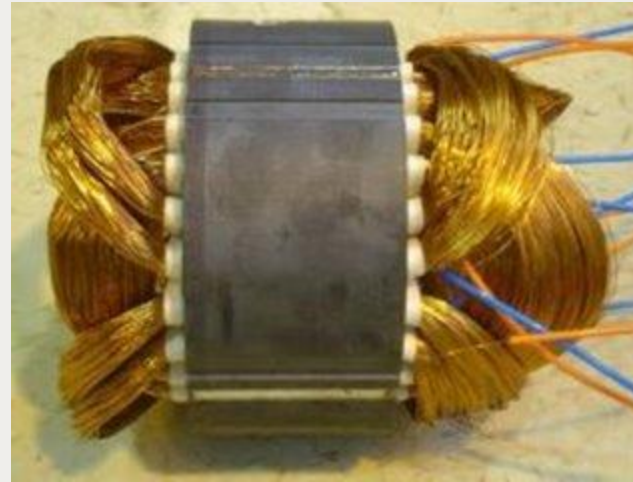
# Tecnología del Motores de inducción de Jaula de Ardilla, SCIM (Squirrel Cage Induction Motors)

Inventado independientemente por  
Nicola Tesla y G. Ferraris en 1885.



Estructura de un motor de inducción trifásico  
de jaula de ardilla.

Fuente: Danfos



**Se usan en más del 90% de los sistemas motores eléctricos;**

- **Buena eficiencia y alta fiabilidad (mantenimiento reducido);**
- **Bajo costo (en comparación con otros tipos de motor);**
- **Fáciles de controlar cuando se los alimenta con un VSD.**

## 3.1 Orígenes de los Motores de Alta Eficiencia

En los años 70 en USA se usaba el motor de Uso General Diseño “NEMA B”, cuya eficiencia la definía la MG1.

Diversos fabricantes (Baldor, Emerson, General Electric, Lesson, etc.) habían diseñado motores de alta eficiencia , etc. Propusieron motores de alta eficiencia entre 1970-1980. Con la crisis del petroleo esta tendencia aumento.

El primer motor de alta eficiencia fue propuesto por la Norma NEMA MG1 en 1989 en la Tabla 12-10, definiendo el “Energy Efficient Motor”. Presentaba eficiencias mayores entre 2 y 6% al motor de uso general Diseño NEMA B. Para motores de 1 a 200 HP.

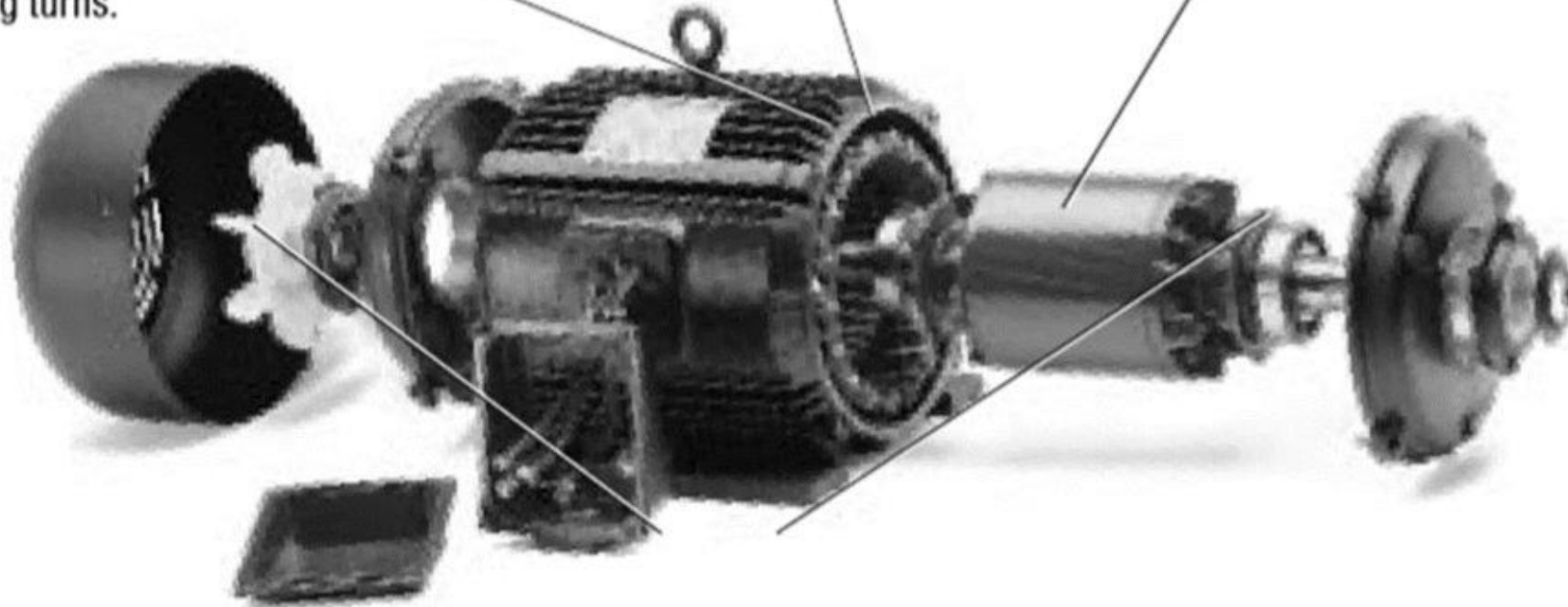
# Características del Energy Efficient Motor

## MAXIMIZING MOTOR EFFICIENCY

Stator losses are reduced by increasing copper volume, reducing turns.

Lamination improvements minimize core loss.

Special designs lower rotor loss.



Stray losses can be lessened through a number of overall design considerations.

Fans, bearings and air flow design improvements can cut friction and windage losses.



## 3.2 Impacto de los MEPS en la aplicación de Motores de Alta Eficiencia



**MEPS:** Minimum Energy Performance Standard

USA en 1992 emitió la ley EAct 92 (Energy Policy Act). El EAct 92 fue el primer MEPS en aplicarse en el mundo para motores eléctricos.

El EAct 92 hizo obligatorio la comercialización del motor Energy Efficient a partir de 1997, para potencias en el rango de 1 a 200 HP y velocidades de 1200, 1800 y 3600 RPM.

En 1994 NEMA amplió el rango de potencia de motores Energy Efficient hasta 500 HP.

### 3.3 Desarrollo del Motor NEMA Premium

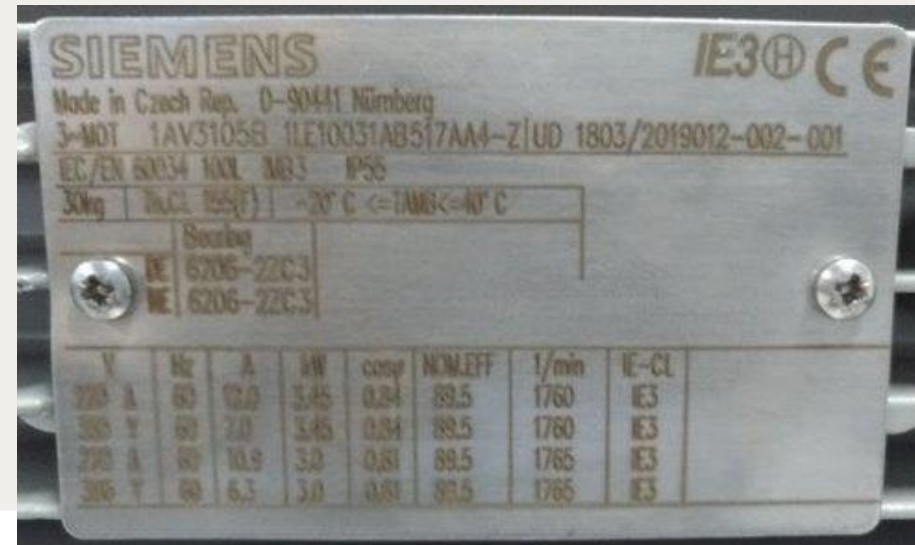
NEMA Premium redujo las pérdidas en 15% respecto al NEMA Energy Efficient

El motor NEMA Premium fue propuesto por la norma NEMA MG1 el año 2001. En su tabla 12-12.

Tienen mejoras considerables respecto al Energy Efficiency EPCAct92

#### El MEPS EISA 2007

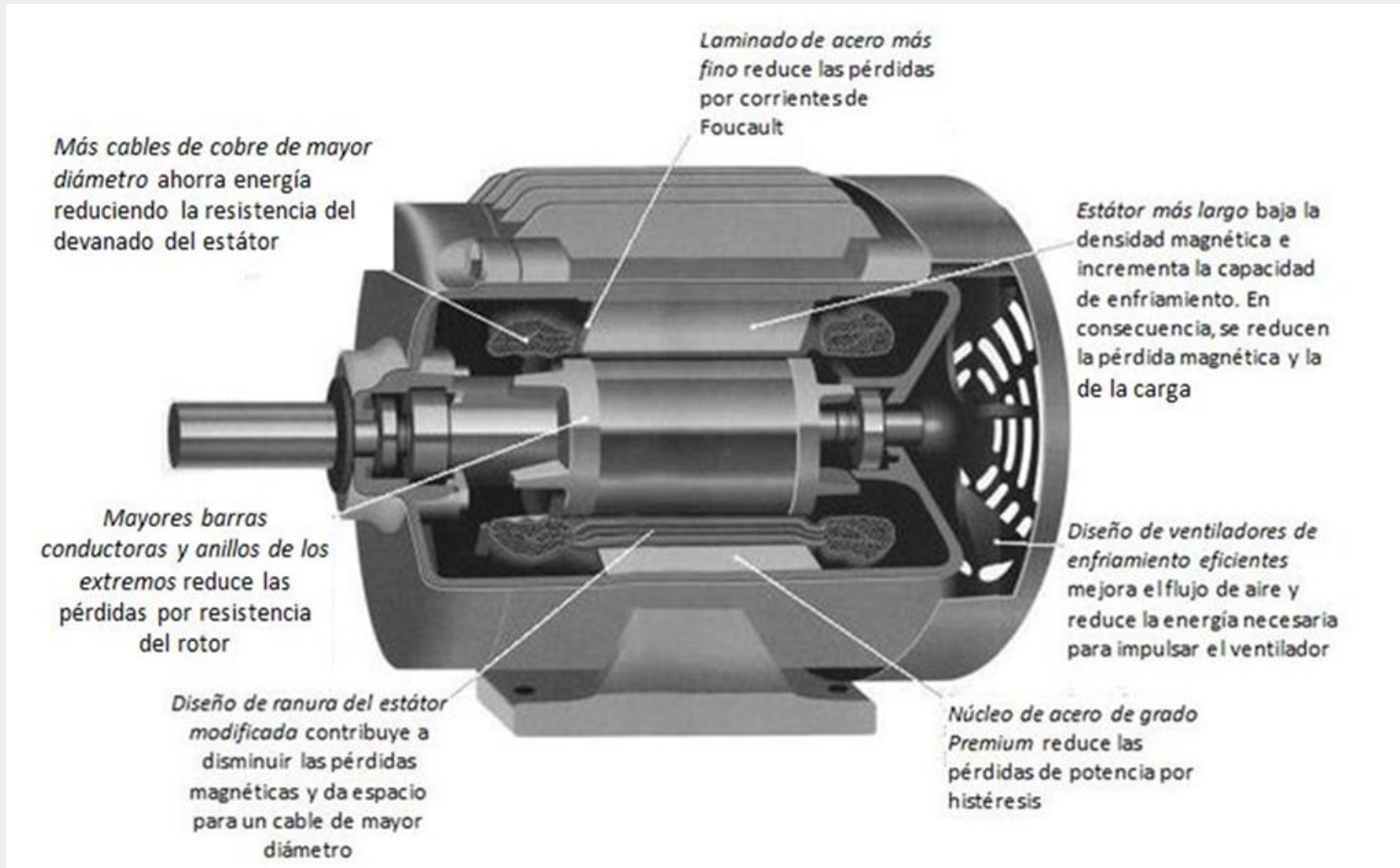
(Energy Independence and Security Act) lo hizo obligatorio el 2010 en el rango de 1 a 200 HP.



**SIEMENS** IE3  $\oplus$  CE  
Made in Czech Rep. D-90441 Nürnberg  
3-MOT 1AV3105B11E10031AB517AA4-Z|UD 1803/2019012-002-001  
EC/EN 60034 IAKL M33 P56  
30kg TdCL 25(F) -30°C <-TAMB<-40°C

Starting									
IE	ME								
IE	ME	6206-22C3							
ME	IE	6206-22C3							
V	Hz	A	NW	comp	NEM.EFF	l/min	IE-CL		
220	Δ	60	12.0	3.45	0.84	89.5	1760	IE3	
380	Y	60	7.0	3.45	0.84	89.5	1760	IE3	
220	Δ	60	10.9	3.0	0.81	89.5	1765	IE3	
380	Y	60	6.3	3.0	0.81	89.5	1765	IE3	

# Mejoras del Motor de Eficiencia Premium, obligatorio a partir de 2010 por el MEPS EISA 2007.



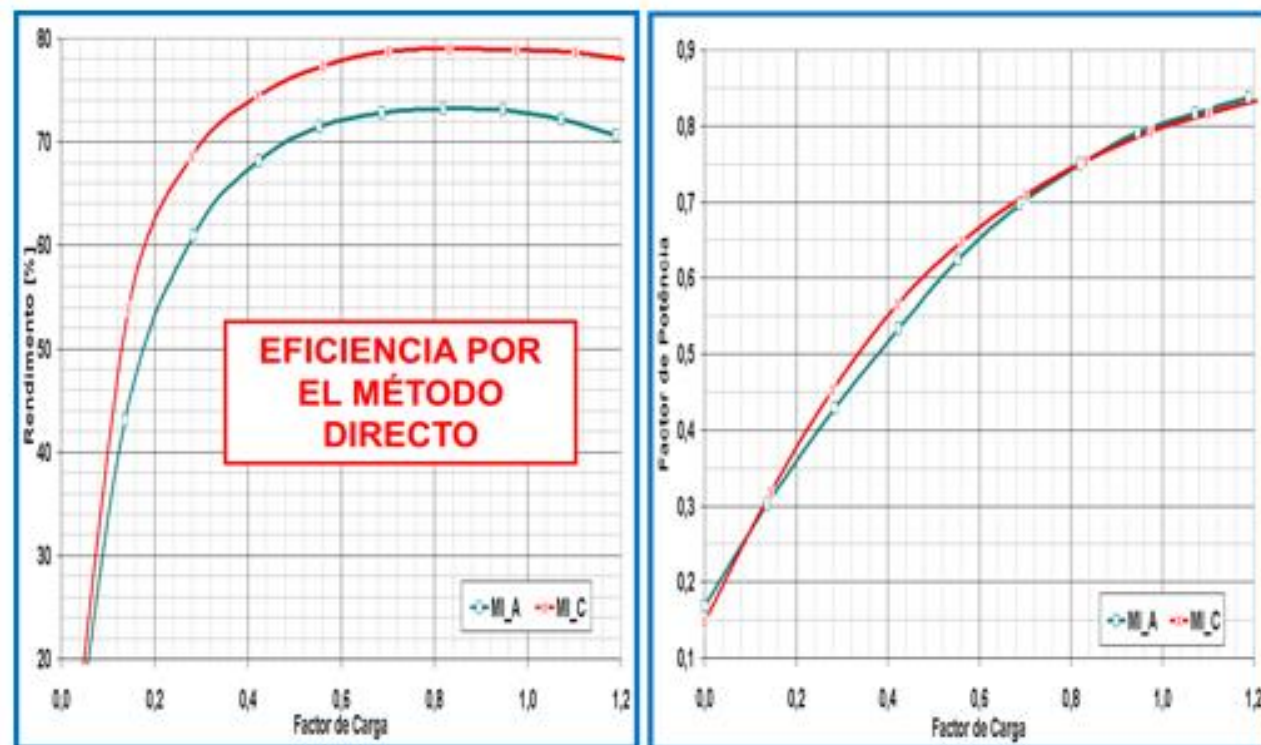
## Motores de inducción – Rotor en cobre inyectado



Mayor eficiencia y menor inercia del rotor, comparado con un rotor en aluminio de un motor eficiente (IE2).

Las pruebas clasifican al de jaula de aluminio como IE2 y al motor de jaula de cobre como IE3.

Fuente: Anibal de Almeida



Motor de inducción energéticamente eficiente – rotor de cobre de fundición y rotor de aluminio (4 polos y 1,1 kW)

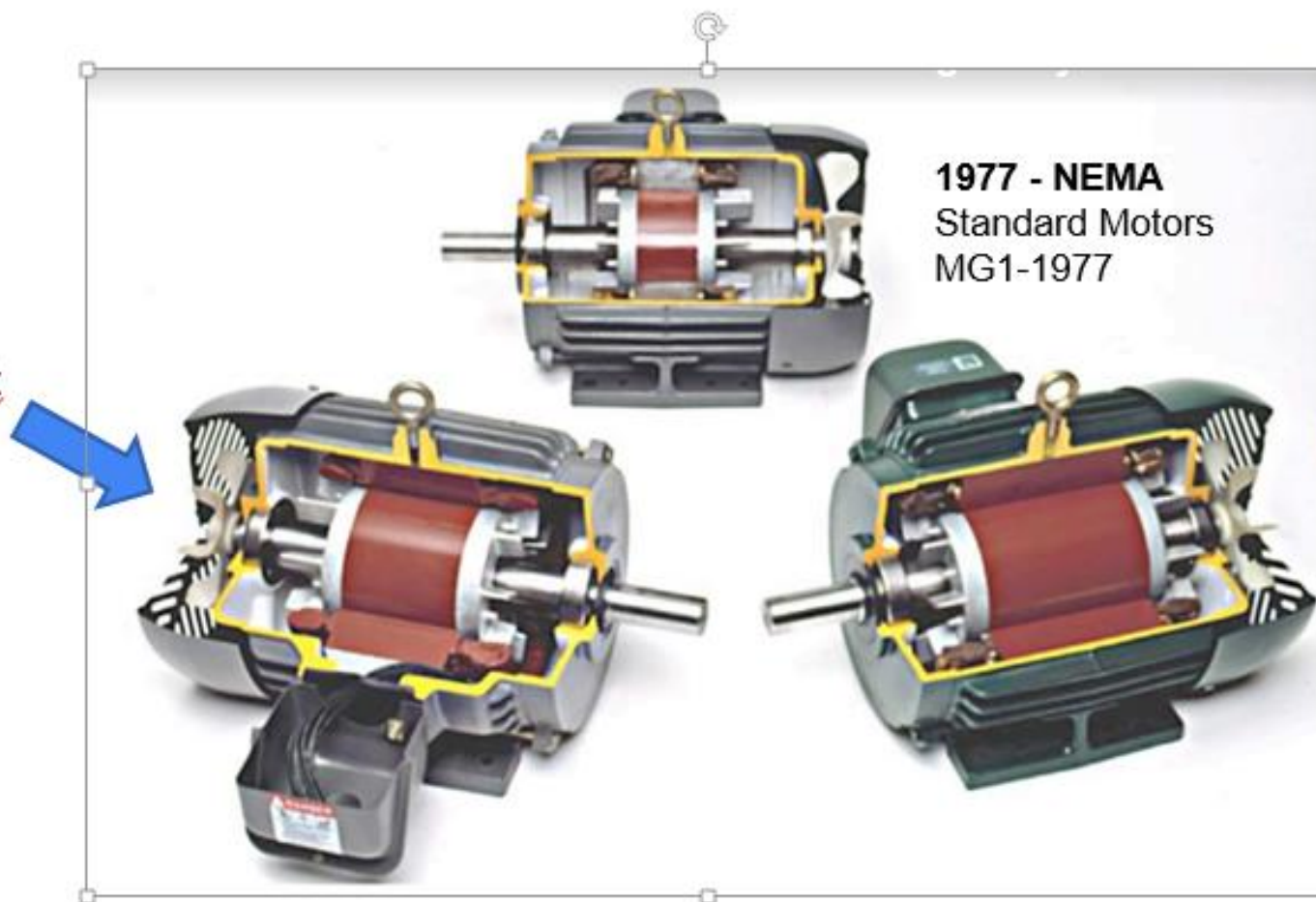


## Evolución Motores Alta Eficiencia y MEPS en EEUU

**1989 - NEMA**  
Energy Efficient  
Motors  
MG1-1987

**EPACT 1992**  
Uso obligatorio  
EE Motors a  
partir de 1997.

Energy Policy Act  
of 1992 (EPAct)



**1977 - NEMA**  
Standard Motors  
MG1-1977

**2001 - NEMA**  
NEMA Premium  
Premium Efficiency  
MG1-2001

**EISA 2007**  
Uso obligatorio  
NEMA Premium  
a partir de 2011.  
Energy Independence and  
Security Act of 2007 (EISA)



# Implementación de MEPS en motores en Europa(EC) 640/2009

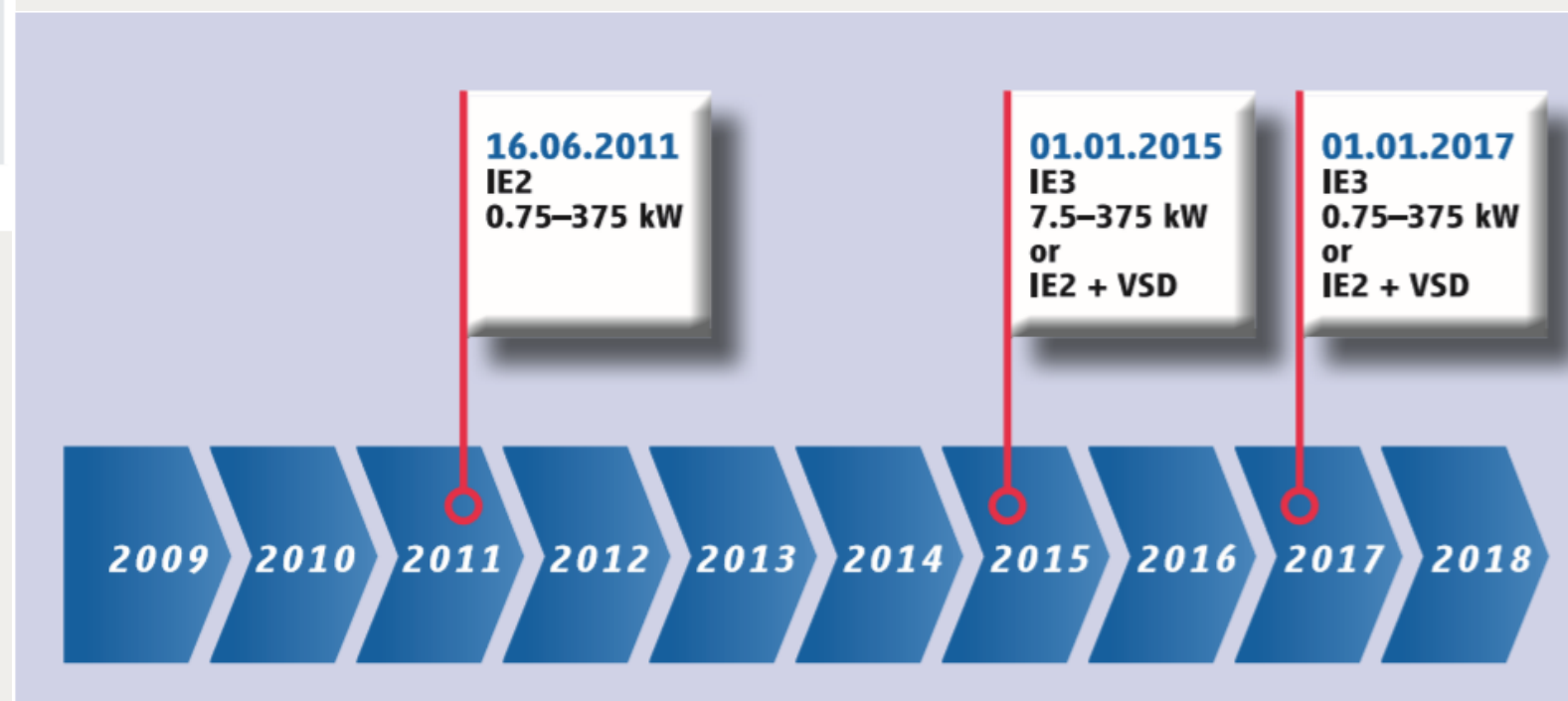
NEMA	IEC	CEMEP
Premium Efficiency	IE3	-
Energy Efficient	IE2	EFF1
Standard Efficiency	IE1	EFF2
-	-	EFF3 (Below standard efficiency)
<b>2001</b>	<b>2008</b>	<b>1999</b>

## EPACT 1992

Uso obligatorio  
Energy Effic 1997

## EISA 2007

Uso obligatorio  
Premium Eff 2011



### 3.4 El Motor de eficiencia “Super- Premium”

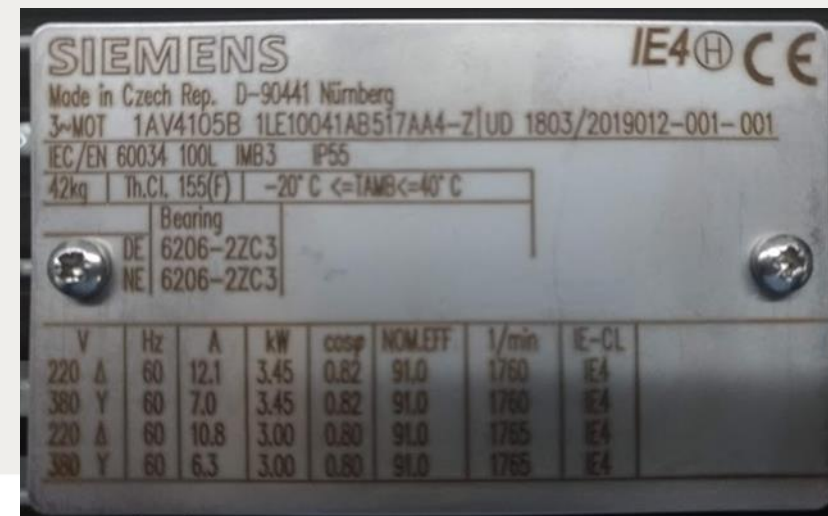
- Propuesto por NEMA con 15% menos de Pérdidas que el motor de Eficiencia Premium.

En este tipo de motores aparecen otras tecnologías adicionales a la clásica de Motores de Inducción de Jaula de Ardilla (SCIM). Estas son:

- Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)
- Line Start Permanent Magnet (LSPM)
- Synchronous Reluctance Motor (SynRM)
- Switched Reluctance Motor (SRM)



Motor de inducción de jaula de Ardilla de eficiencia Super Premium o IE4



## Motores Sincrónicos de Imán Permanente, PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors)



No tienen pérdidas en el devanado del motor y por lo tanto son más eficientes. Necesitan VFD para operar. Los motores de imán *permanente superficial* son propensos a desmagnetización a altas temperaturas. Los motores de imán *permanente interior* son menos susceptibles a la desmagnetización y presentan más confiabilidad a altas temperaturas.

## Motores Sincrónicos de Imán Permanente de arranque directo, LSPM (Line Star Permanent Magnet)

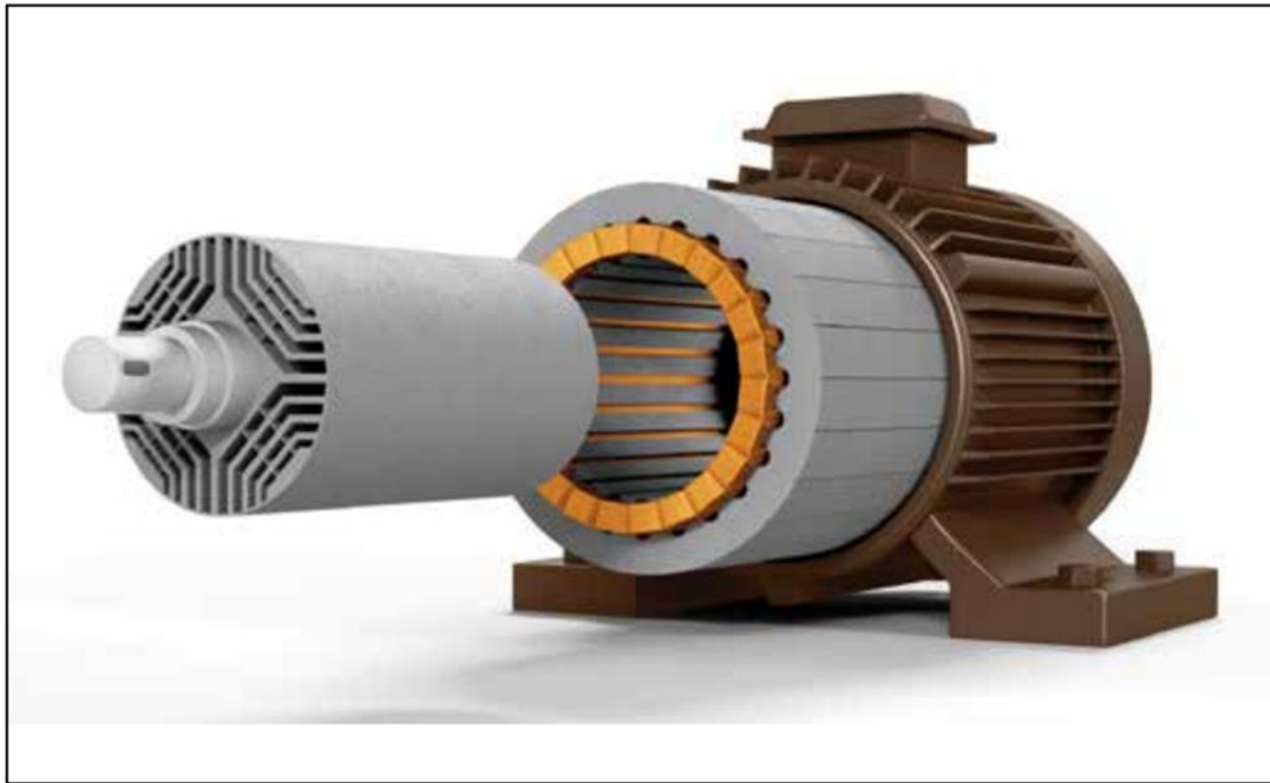


- Pueden reemplazar a un motor de inducción.
- No necesitan Variador de Frecuencia para arrancar.
- Operan solo a la velocidad de sincronismo de la red.

Motores de Imán Permanente de Arranque Directo  
(Line Start Permanent Magnet - LSPM)



# Tecnología de Motores Síncronos de Reluctancia, SynRM (Synchronous Reluctance Motors)



Fuente: Danfos



Fuente: Anibal de Almeida, 2018

No tiene imanes en el rotor y opera a baja temperatura.

Requiere VFD para operar

El SynRM con un VFD estándar es un Sistema de alta potencia y alta eficiencia

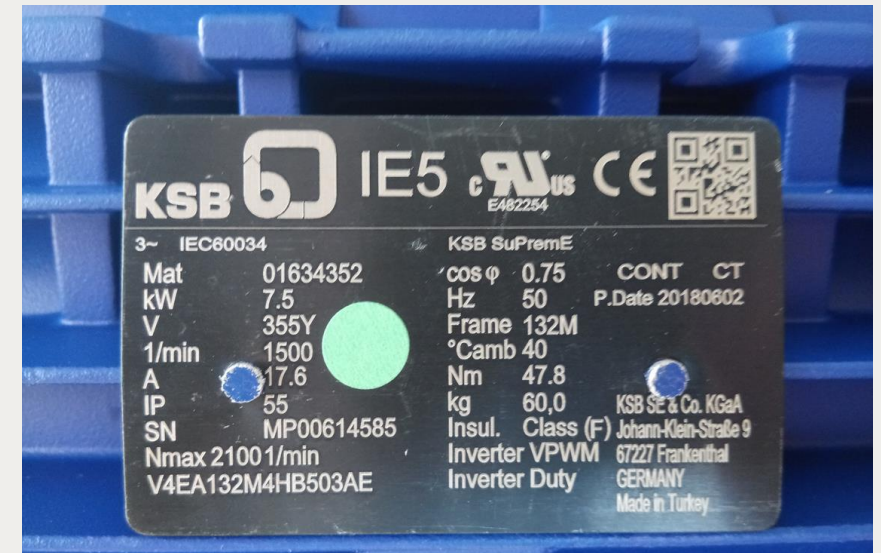
Presenta una alta densidad de potencia



## Motor de eficiencia “Ultra-Premium” (IE5)

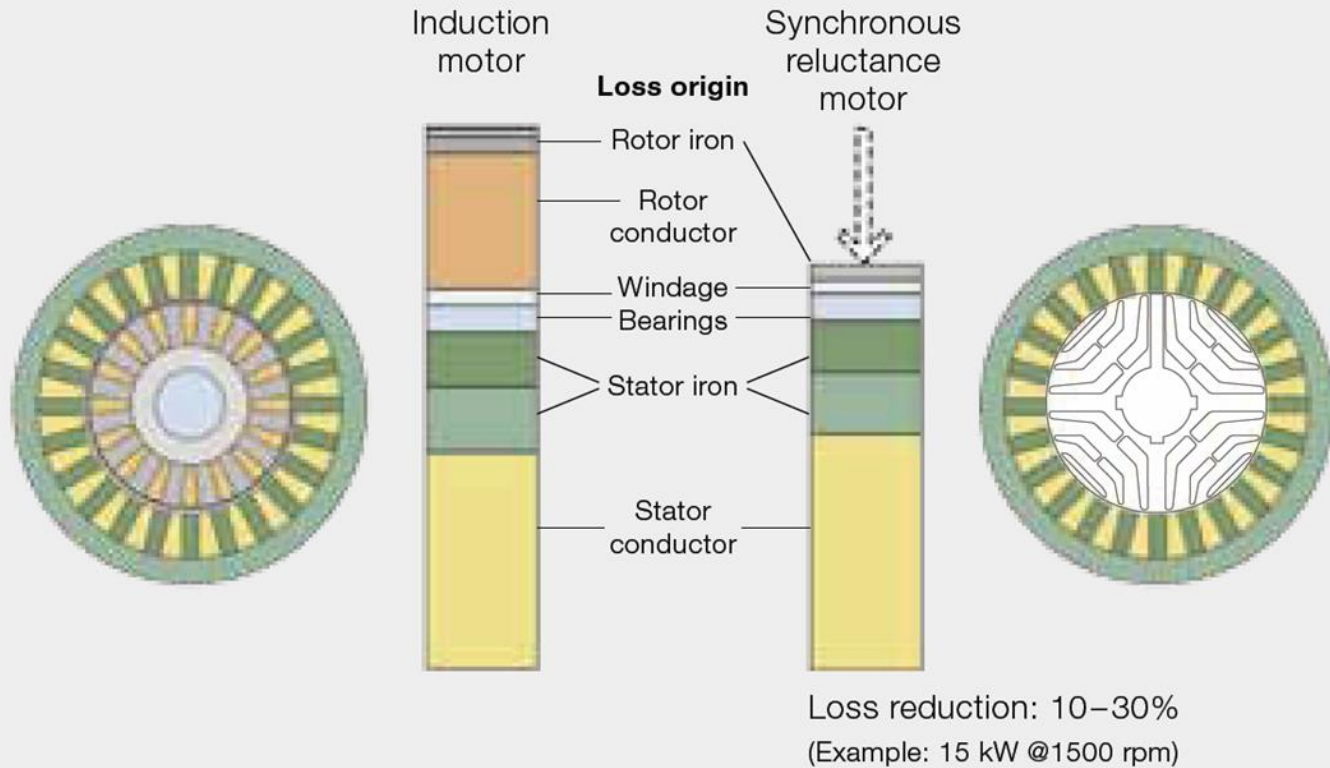
Propuesto por NEMA el 2010 tiene al menos un 20 % menos de pérdidas que los motores Super-Premium (IE4).

- El nivel de eficiencia Ultra Premium o IE5 es el mayor nivel de eficiencia propuesto en 2014 y normalizado.
- Pero la tecnología clásica del motor de inducción jaula de ardilla (SCIM) esta descartada para este nivel de eficiencia.
- Las tecnologías disponibles para los motores IE5, son: SynRM, PMSM y otras en desarrollo.

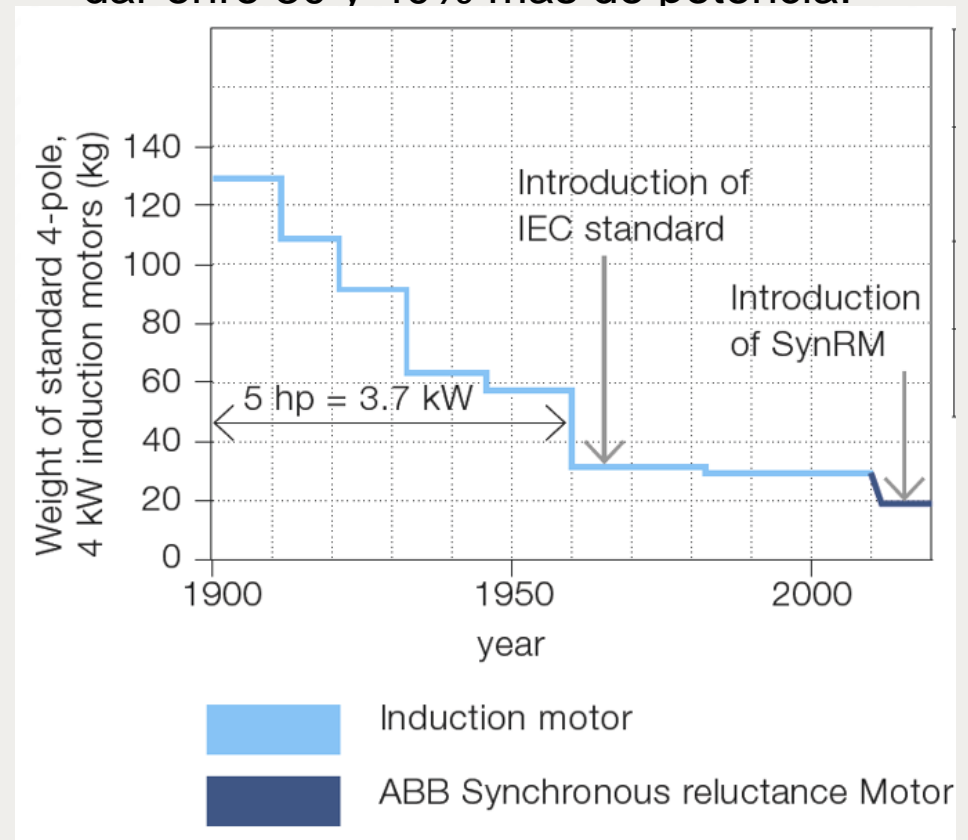


Motor Sincrónico de Reluctancia  
Ultra-Premium (IE5)

# Incremento de eficiencia debido a la reducción de pérdidas en el rotor en motores SynR



El SynRM tiene una alta densidad de potencia, para el mismo frame puede dar entre 30 y 40% más de potencia.

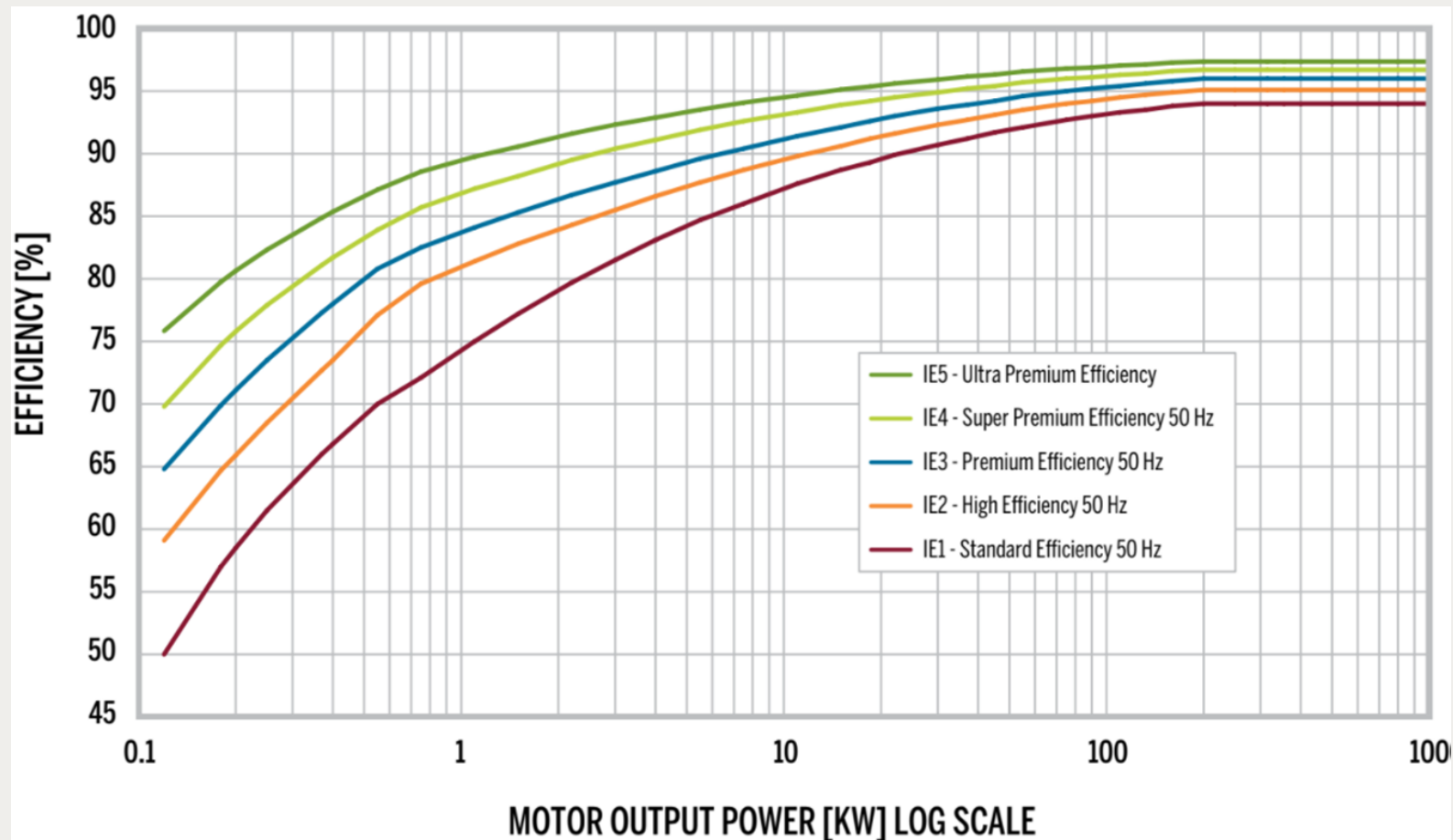


# Equivalencia de los niveles de eficiencia para motores, normas IEC y NEMA



IEC 60034-30-1: 2014	NEMA MG1-2016
IE1	Standard Efficiency
IE2	High Efficiency (Energy Efficient EPCAct)
IE3	Premium Efficiency
IE4	Super- Premium Efficiency
IE5	Ultra- Premium Efficiency

# Niveles de Eficiencia (IE)



**ANSI/NEMA MG1- 2016:**  
Motor and Generators

Clases de eficiencia de motores en la IEC 60034-30-1 (4 polos, 50 Hz). Hay otra curva para 60 Hz.

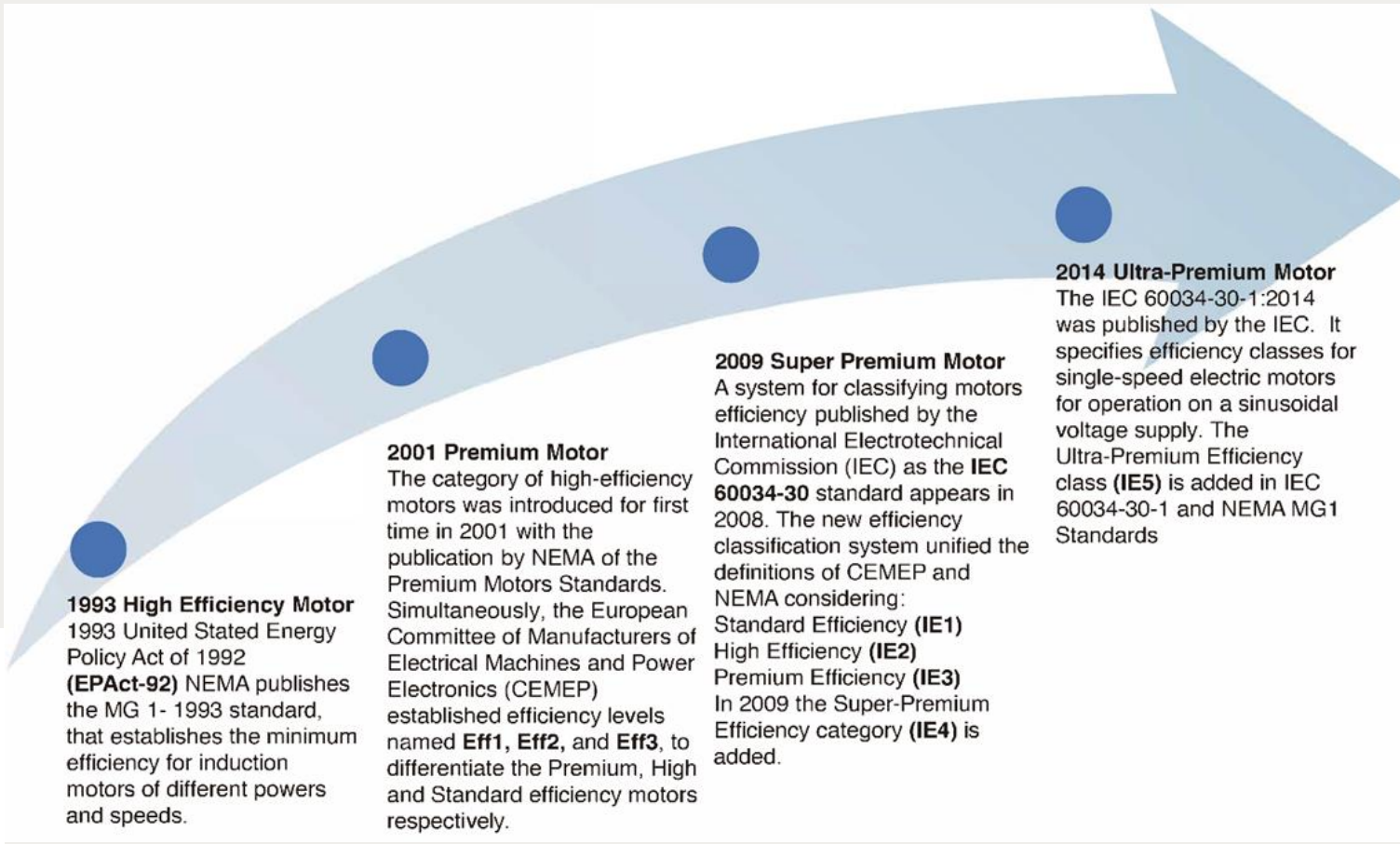


## Clase de Eficiencia

## Relación de Pérdidas y la Clase de Eficiencia del motor.



IE3	15% menos de pérdidas que el motor High Efficiency (IE2)
IE4	15% menos de pérdidas que el motor Premium Efficiency (IE3)
IE5	20 % menos de pérdidas que los motores Super-Premium Efficiency (IE4)



**1993 High Efficiency Motor**  
 1993 United States Energy Policy Act of 1992 (EPAct-92) NEMA publishes the MG 1- 1993 standard, that establishes the minimum efficiency for induction motors of different powers and speeds.

**2001 Premium Motor**  
 The category of high-efficiency motors was introduced for first time in 2001 with the publication by NEMA of the Premium Motors Standards. Simultaneously, the European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP) established efficiency levels named **Eff1**, **Eff2**, and **Eff3**, to differentiate the Premium, High and Standard efficiency motors respectively.

**2009 Super Premium Motor**  
 A system for classifying motors efficiency published by the International Electrotechnical Commission (IEC) as the **IEC 60034-30** standard appears in 2008. The new efficiency classification system unified the definitions of CEMEP and NEMA considering: Standard Efficiency (**IE1**) High Efficiency (**IE2**) Premium Efficiency (**IE3**) In 2009 the Super-Premium Efficiency category (**IE4**) is added.


**2014 Ultra-Premium Motor**  
 The IEC 60034-30-1:2014 was published by the IEC. It specifies efficiency classes for single-speed electric motors for operation on a sinusoidal voltage supply. The Ultra-Premium Efficiency class (**IE5**) is added in IEC 60034-30-1 and NEMA MG1 Standards





# Resumen de Tecnologías de motores trifásicos disponibles en los mercados

ASYNCHRONOUS MOTORS



**IE1**  
Standard Efficiency

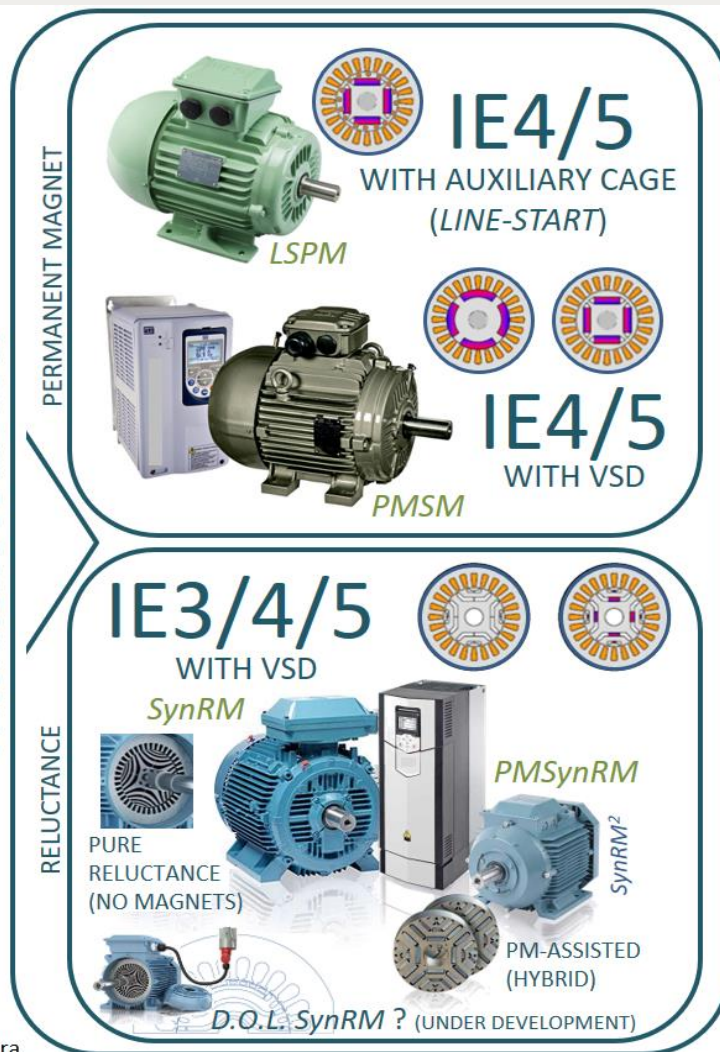
**IE2**  
High Efficiency

**IE3**  
Premium Efficiency

**IE4**  
Super-Premium Efficiency  
SCIM

IE4/5  
↑  
IE3/4

SYNCHRONOUS MOTORS



**IE4/5**  
WITH AUXILIARY CAGE (LINE-START)  
LSPM

**IE4/5**  
WITH VSD  
PMSM

**IE3/4/5**  
WITH VSD  
SynRM

PURE RELUCTANCE (NO MAGNETS)

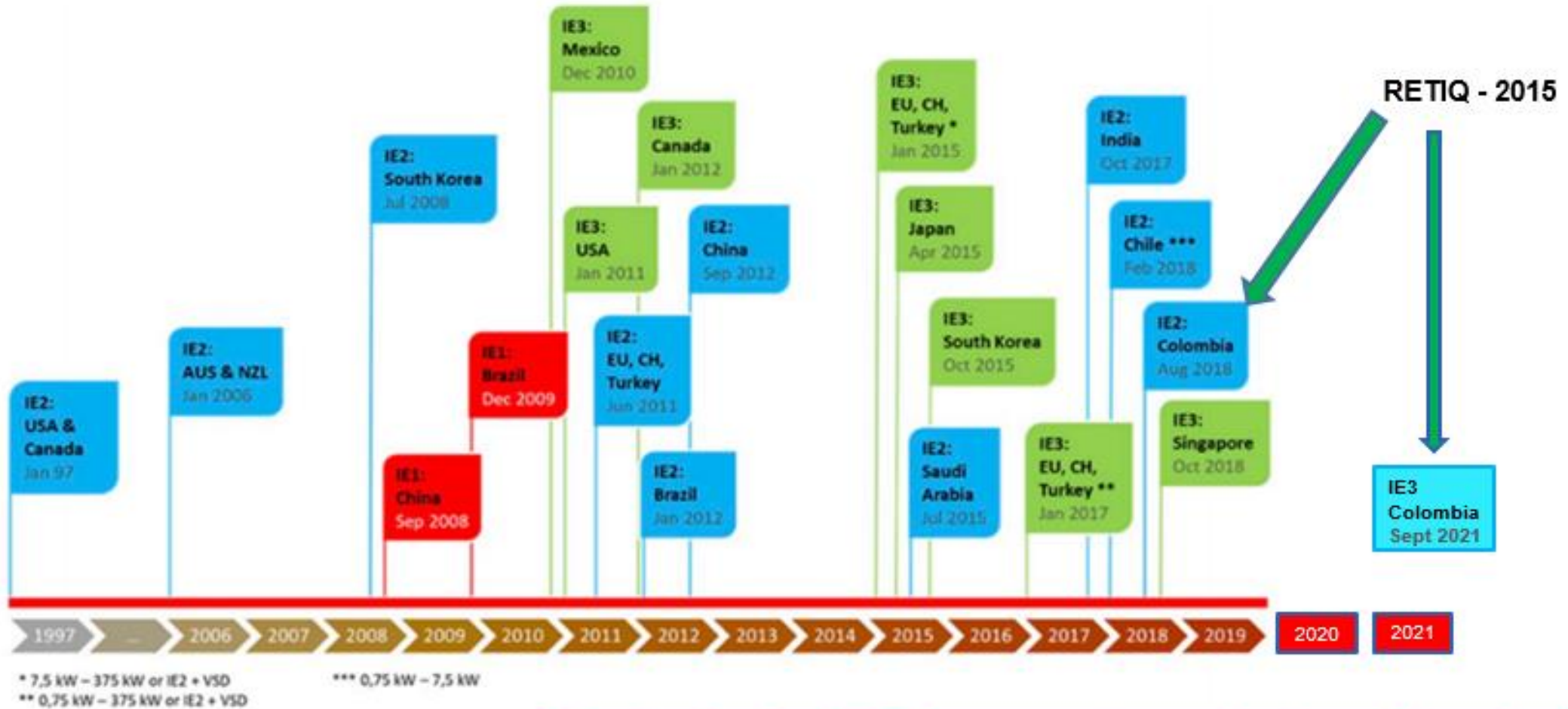
PMSynRM

SynRM<sup>2</sup>

PM-ASSISTED (HYBRID)

D.O.L. SynRM ? (UNDER DEVELOPMENT)

# Políticas Regulatorias. Leyes, Reglamentos, Normas, MEPS



Fuente: De Almeida et al. (2019), Elsevier

**Evolución de MEPS para motores de alta eficiencia**

## 4. Conclusiones

1. Los motores eléctricos de alta eficiencia han tenido una gran evolución en los últimos 20 años
2. Las normas internacionales de los motores de alta eficiencia están unificadas.
3. Los MEPS han sido muy importantes en la evolución de los motores de alta eficiencia.
4. Colombia en reglamentación al darse el RETIQ en 2015, se ha equiparado al estándar mundial de los MEPS.
5. Actualmente se siguen desarrollando nuevos motores de alta eficiencia para autos electricos.

# Información personal

- Enrique C. Quispe
- E-mail: [ecquispe@uao.edu.co](mailto:ecquispe@uao.edu.co)
- Teléf: 6023188000 Ext 11856
- Univ. Autónoma de Occidente

Organizan:



Apoya:

