



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# Reutilización y recuperación de materiales en las máquinas eléctricas: *consideraciones sobre análisis de ciclo de vida, confiabilidad y economía circular*

Expositor: Prof. Oscar Núñez Mata

Equipo de Investigadores:

*Oscar Núñez Mata*

*Mauricio Espinoza Bolaños*

*Víctor Vega Garita*

*Aramis Pérez Mora*



*Jornadas de investigación gestión de residuos eléctricos y electrónicos*

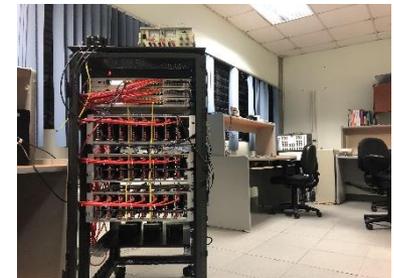
*Diciembre 2020*

EIE

Escuela de  
Ingeniería Eléctrica

# LabCES: Conversión de Energía

Mediante **prototipos experimentales y pruebas**, este laboratorio combina diferentes áreas de la ingeniería eléctrica con el fin de proporcionar **nuevas soluciones** para la sustentabilidad del ambiente, basado en el uso eficiente de los recursos energéticos y potenciar las energías renovables.



# Contenido

---

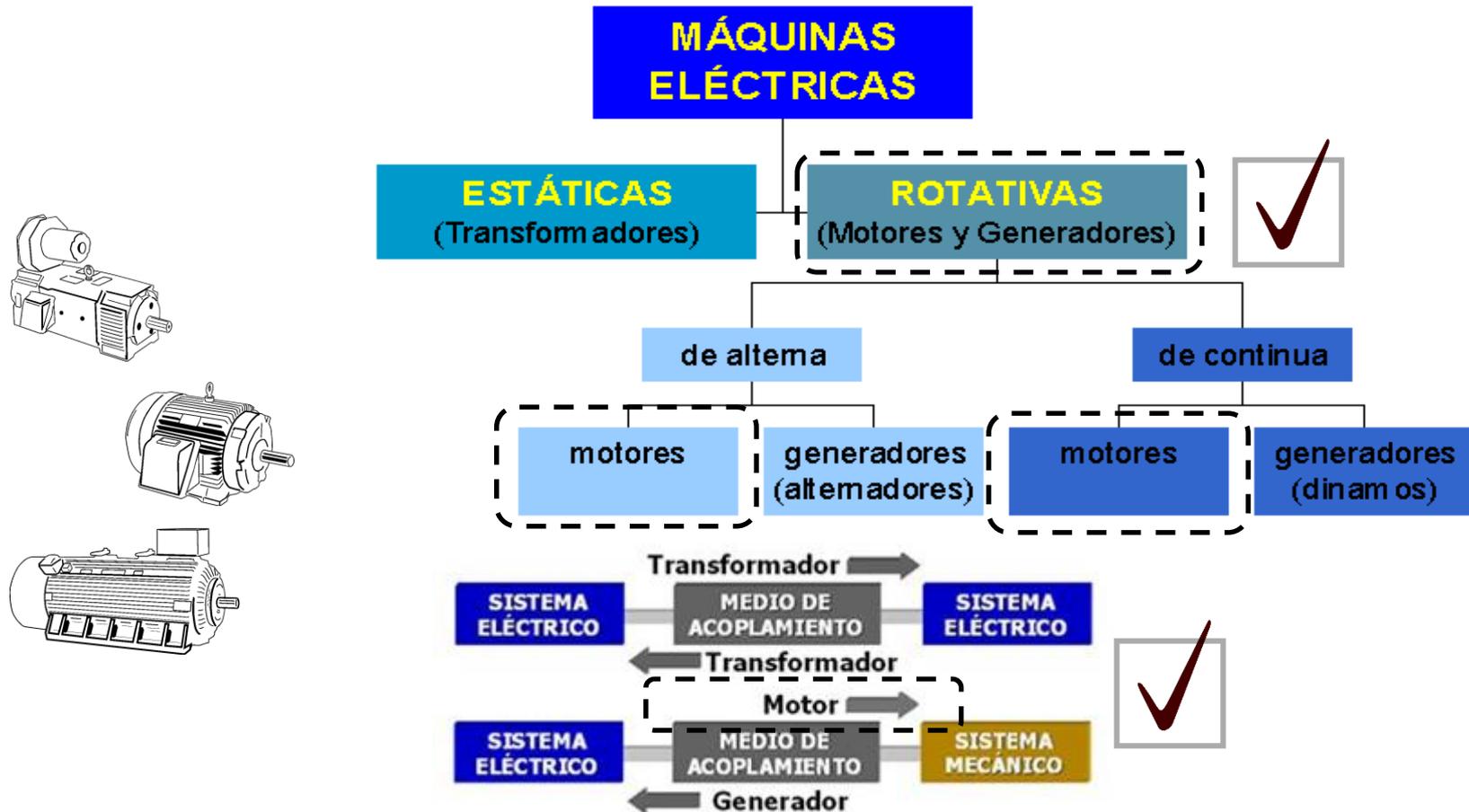
---

1. Introducción
2. Planteamiento del problema
3. Economía circular
4. Confiabilidad
5. Ciclo de vida
6. Caso de estudio
7. Conclusiones

Nuestro objetivo es colocar el tema de la **reparación y uso de las máquinas eléctricas** (hoy enfocado a motores) en la mesa de discusión.

# 1. Introducción

## Antecedentes: *el motor eléctrico*



# 1. Introducción

## Desarrollo histórico de motor eléctrico

1873

*Zénobe Gramme*

*Motor CC*



1888

*Tesla-Ferraris*

*Motor CA bifásico*

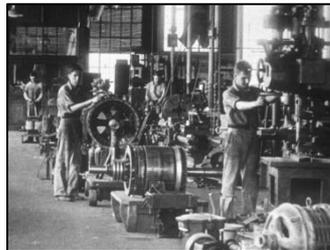


1893

*Dolivo-Dobrowolsky*

*Motor CA trifásico*

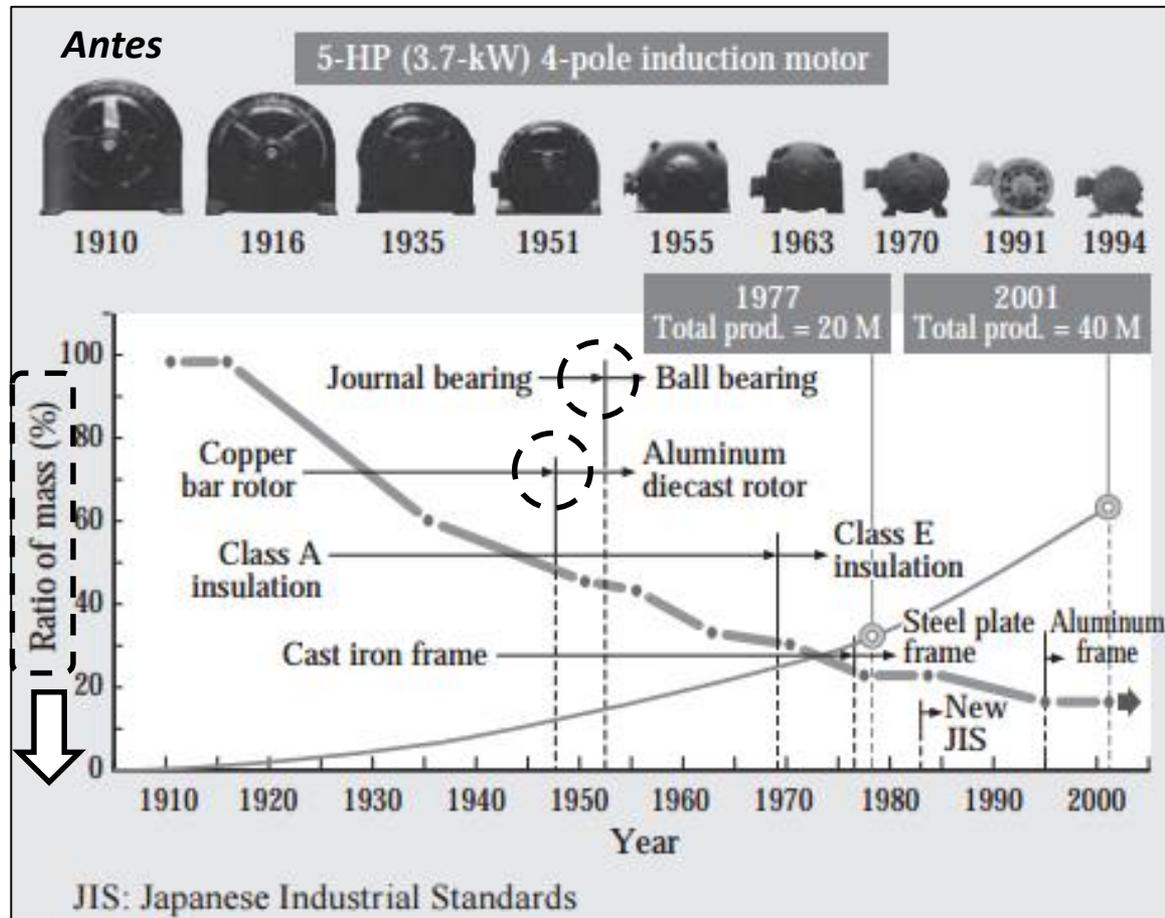
La historia de la **reparación de máquinas** en CRI tiene más de 100 años de antigüedad.



Fábrica en Europa, ~1910.

# 1. Introducción

## Evolución del motor eléctrico CA

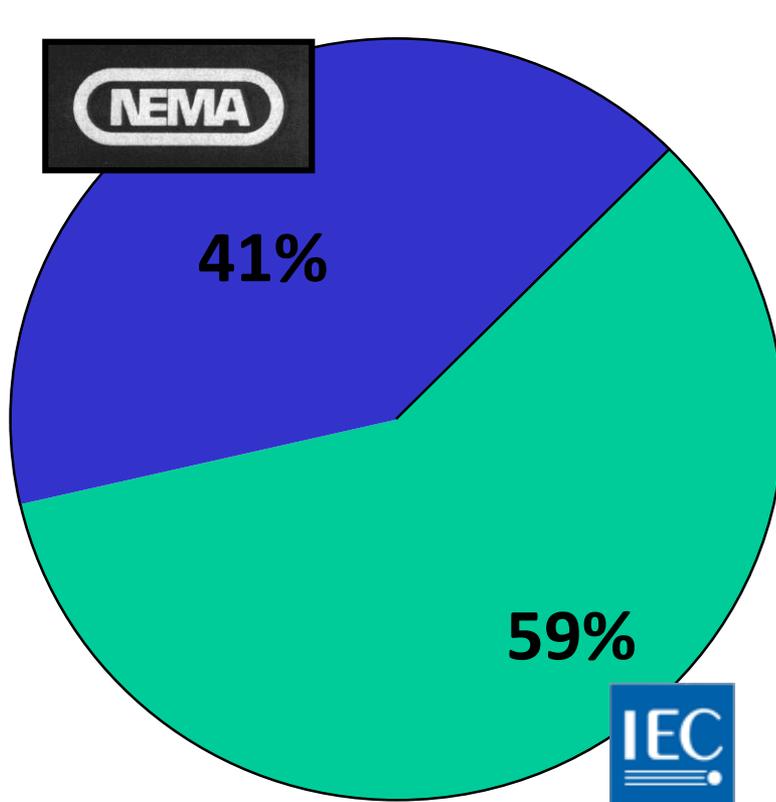


**Hoy**



# 1. Introducción

## Normalización: *mercado de motores industriales*



- IEC \$5.5B
- NEMA \$3.9B

*Mercado global:*

**IEC:** Comité Electrotécnico Internacional:  
*Std. 60034.*

**NEMA:** Asociación Nacional de Fabricantes  
Eléctricos: *Std. MG-1.*

Ambas normativas definen los **niveles de eficiencia** para motores comercializados.

# 1. Introducción

## Normas de eficiencia: *historia*



### EUROPA

- **1998:** Primeros pasos de regulación de eficiencia en motores.
- El acuerdo alcanzado fue de carácter voluntario.
- **2009:** Se dio un paso más y aprobó regulaciones más exigentes y obligatorias (paulatinas) en motores CA: 0,746 [kW] a 375 [kW].



### NORTEAMÉRICA

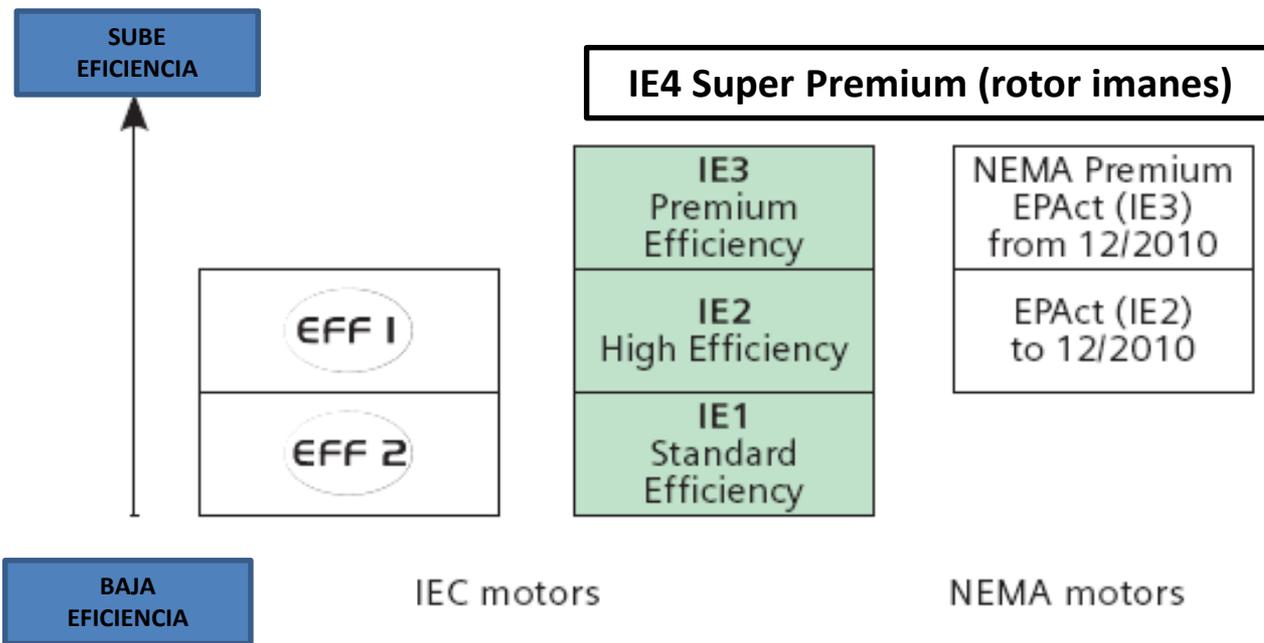
- **1987:** Primeras medidas de eficiencia.
- **1992:** Se emitió la primera ley de carácter obligatorio, con niveles mínimos.
- **1997:** La ley empezó a regir.
- **2007:** Congreso EUA aprobó ley uso de motores con nivel más alto a partir 2010.



### LATINOAMÉRICA

- Algunos países han establecido restricciones de instalación y fabricación de motores con bajo nivel de eficiencia.
- Otros se encuentran en desarrollo.

# Niveles de eficiencia en motores eléctricos



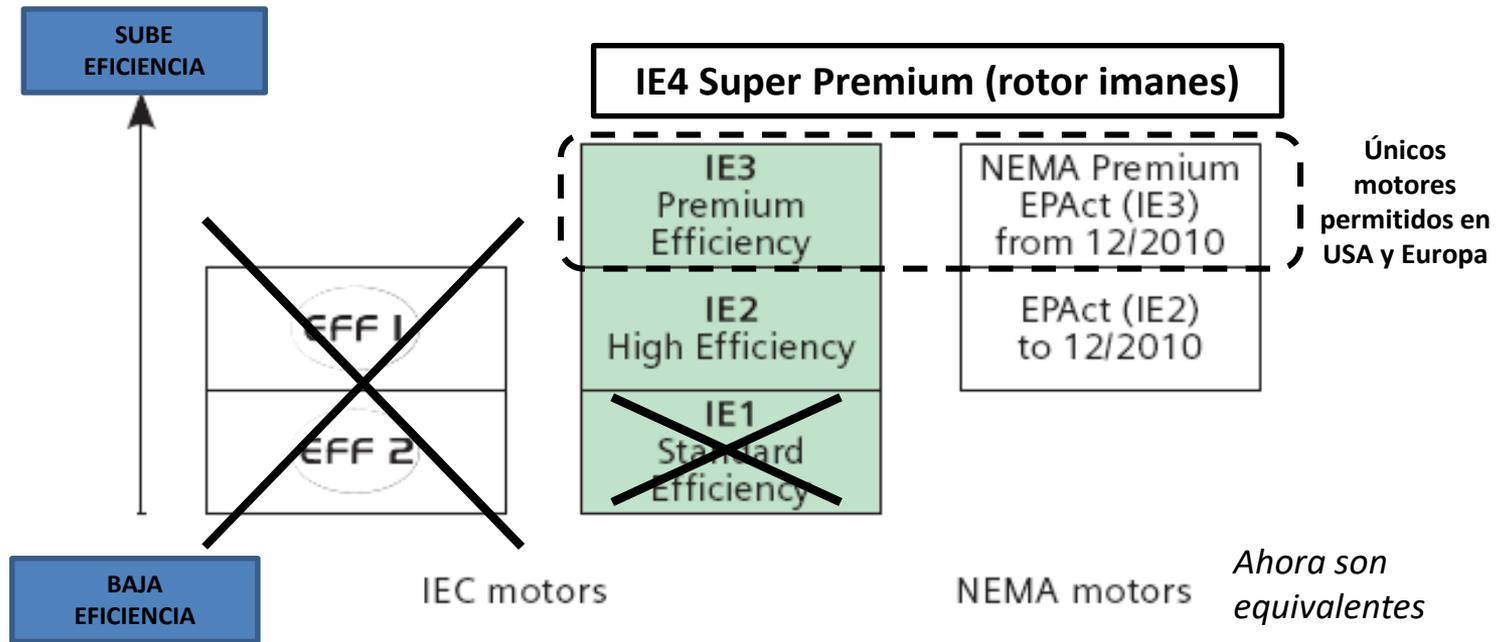
Octubre 2008: modificaciones a IEC-60034, rige fabricación motores BT.

Principal diferencia en la manera de probarlos.

Más estricta verificación y certificación en fábrica.

Aunque cada país deberá adoptar regulaciones propias.

# Niveles de eficiencia en motores eléctricos



Octubre 2008: modificaciones a IEC-60034, rige fabricación motores BT.

Principal diferencia en la manera de probarlos.

Más estricta verificación y certificación en fábrica.

Aunque cada país deberá adoptar regulaciones propias.

---

# 1. Introducción

## Normas INTE E13 - 2018 (Costa Rica)

---

- Con la meta de **carbono neutralidad**, el MINAE desarrolló el VII Plan Nacional de Energía (2015-2030).
- Establece **políticas energéticas** para el sector electricidad, e implementa acciones frente al cambio climático global.
- Cubre **equipos consumidores** de energía (industria), como el caso de motores eléctricos: *se propicia elevar nivel de eficiencia mediante el cambio tecnológico.*
- Implica la **obligatoriedad** en la regulación del ingreso de motores al país mediante la respectiva Reglamentación Técnica, garantizando, además, la competitividad del país.

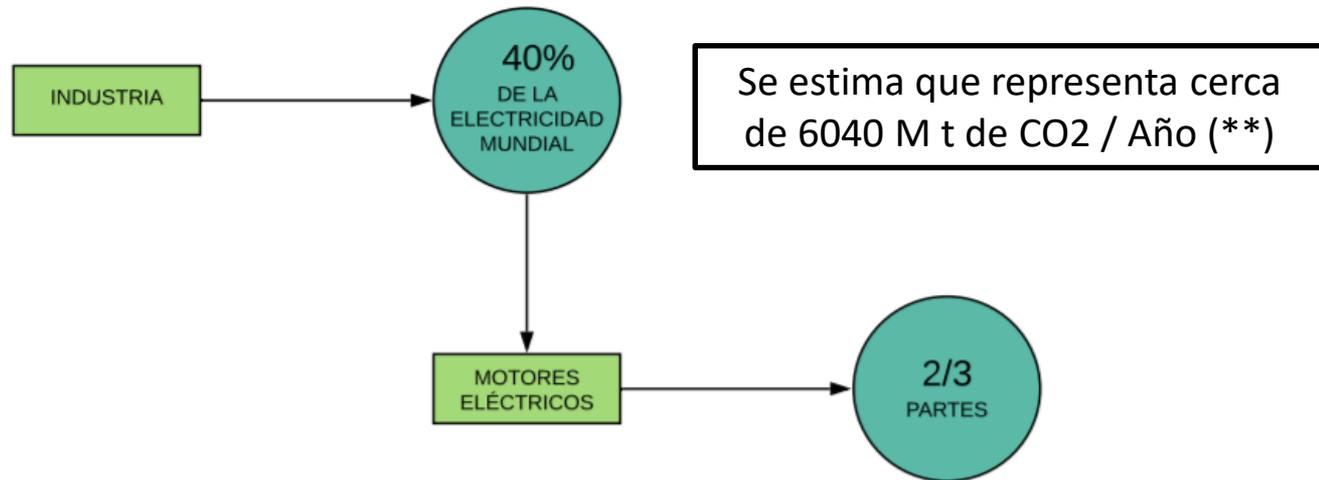


Tendrá carácter **obligatorio** una vez que el MINAE desarrolle y apruebe el **reglamento de implementación**

## 2. Planteamiento del problema

### Energía eléctrica mundial

Consumo eléctrico mundial (\*):

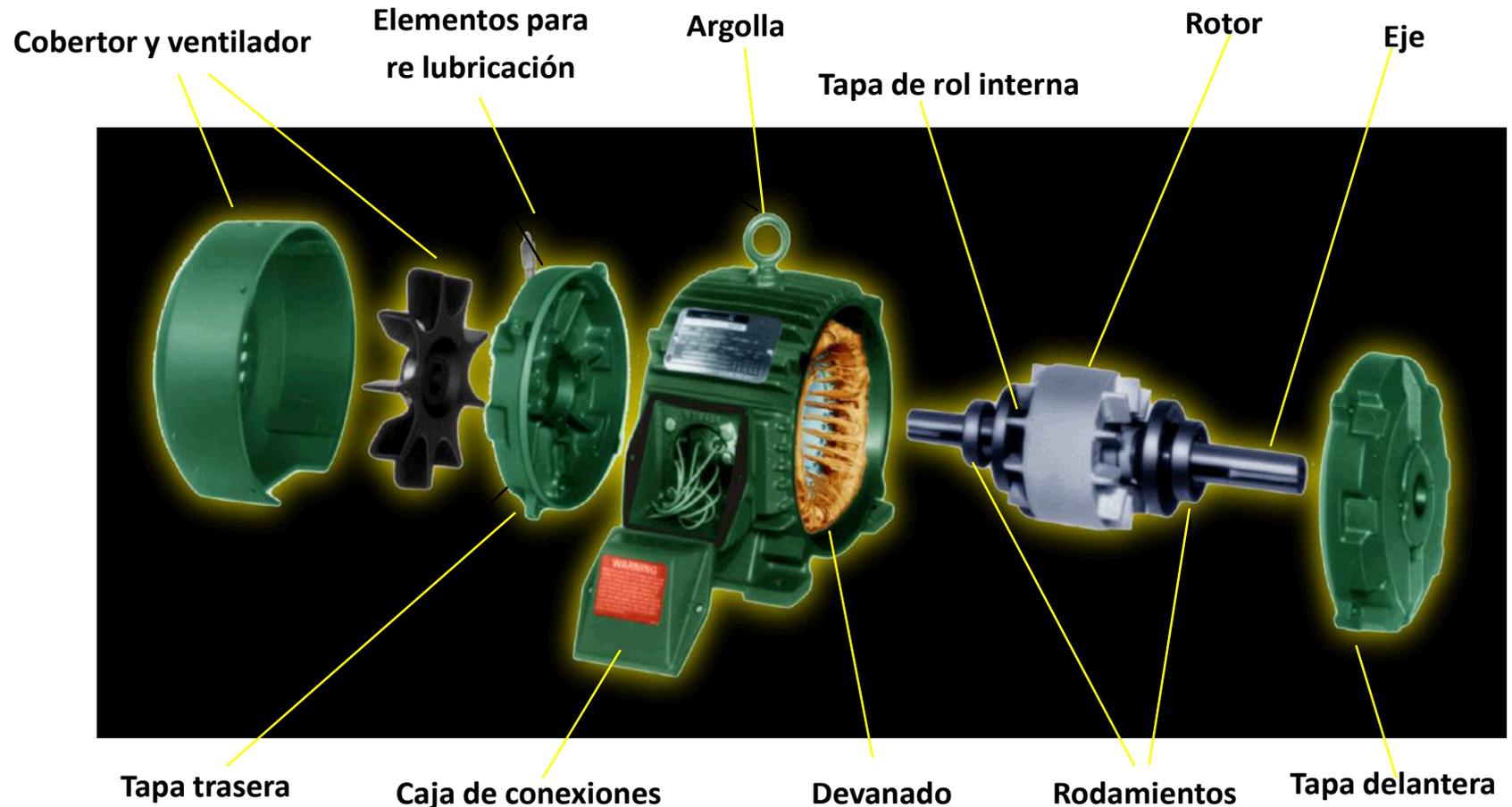


**Paradas no programadas de motores – Tienen consecuencias**



## 2. Planteamiento del problema

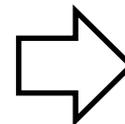
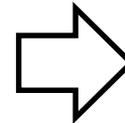
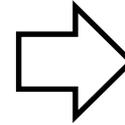
### Partes del motor eléctrico de inducción (materiales)



## 2. Planteamiento del problema

### Tipos de motores eléctricos (costo de oportunidad)

- **De Propósito General**, se mantienen en stock y se entregan rápidamente (*ofrecen modificaciones rápidas para agregar accesorios especiales*).
- **Para Fabricantes de Equipos Originales** (OEM), son de diseño especial se protege su reemplazo (*tiempos de entrega prolongados*).
- **De Fabricación Especial**, hechos a la medida de la aplicación, no se mantienen en stock (*tiempos de entrega prolongados*).



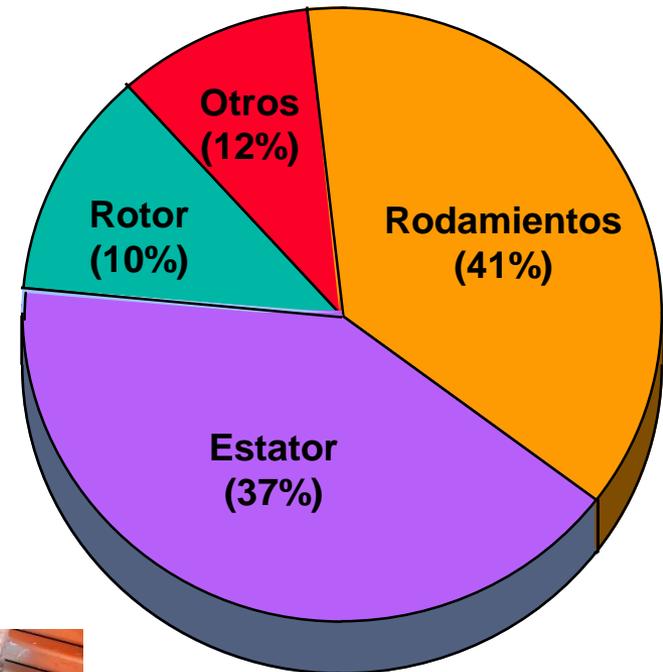
## 2. Planteamiento del problema

### Fallas en motores eléctricos (incidencia)

INCIDENCIA DE FALLAS

41%  
DEFECTOS DEL TIPO ELÉCTRICO

Estudio de fallas en motores eléctricos BT

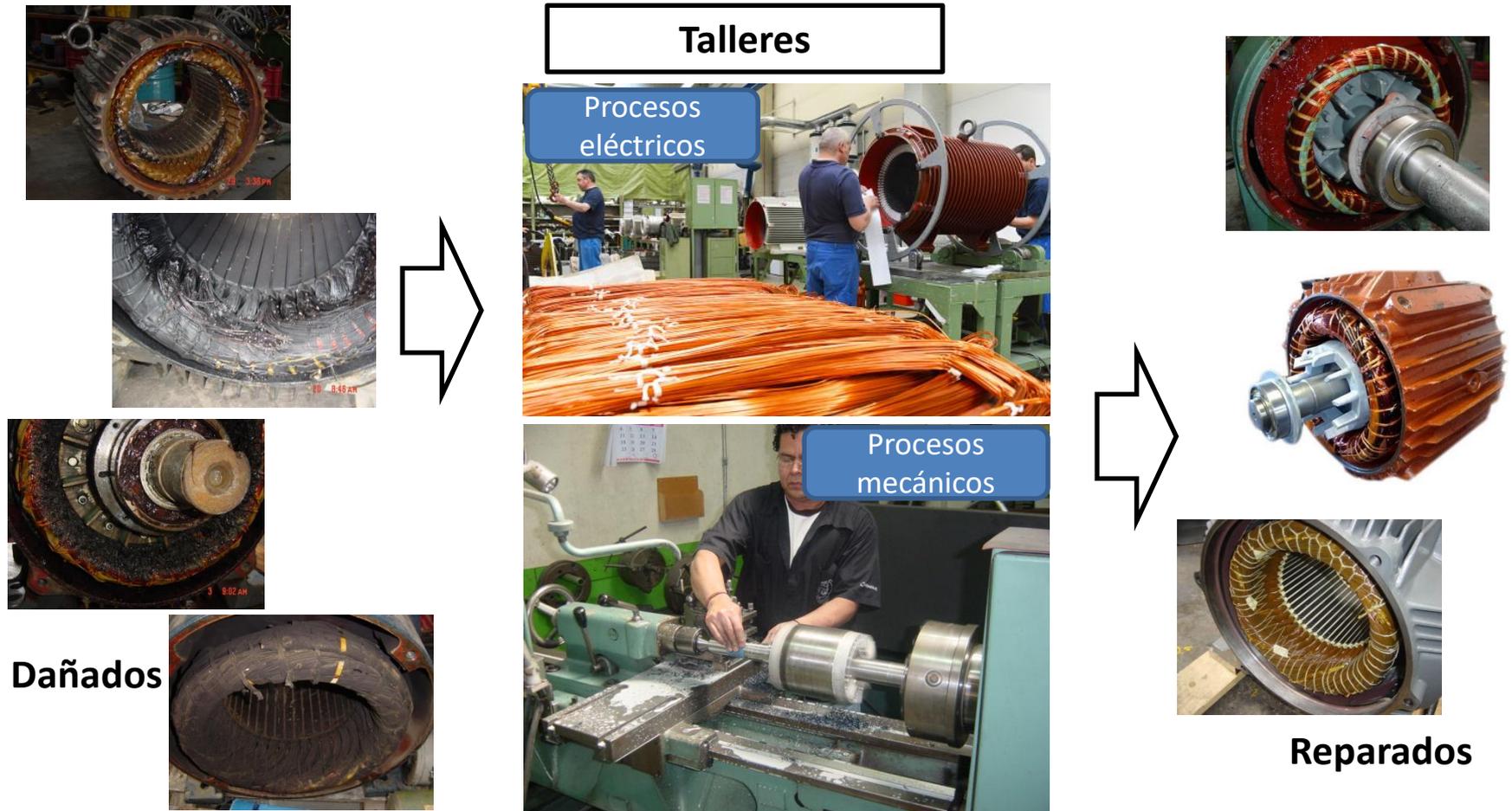


Fotos de fallas



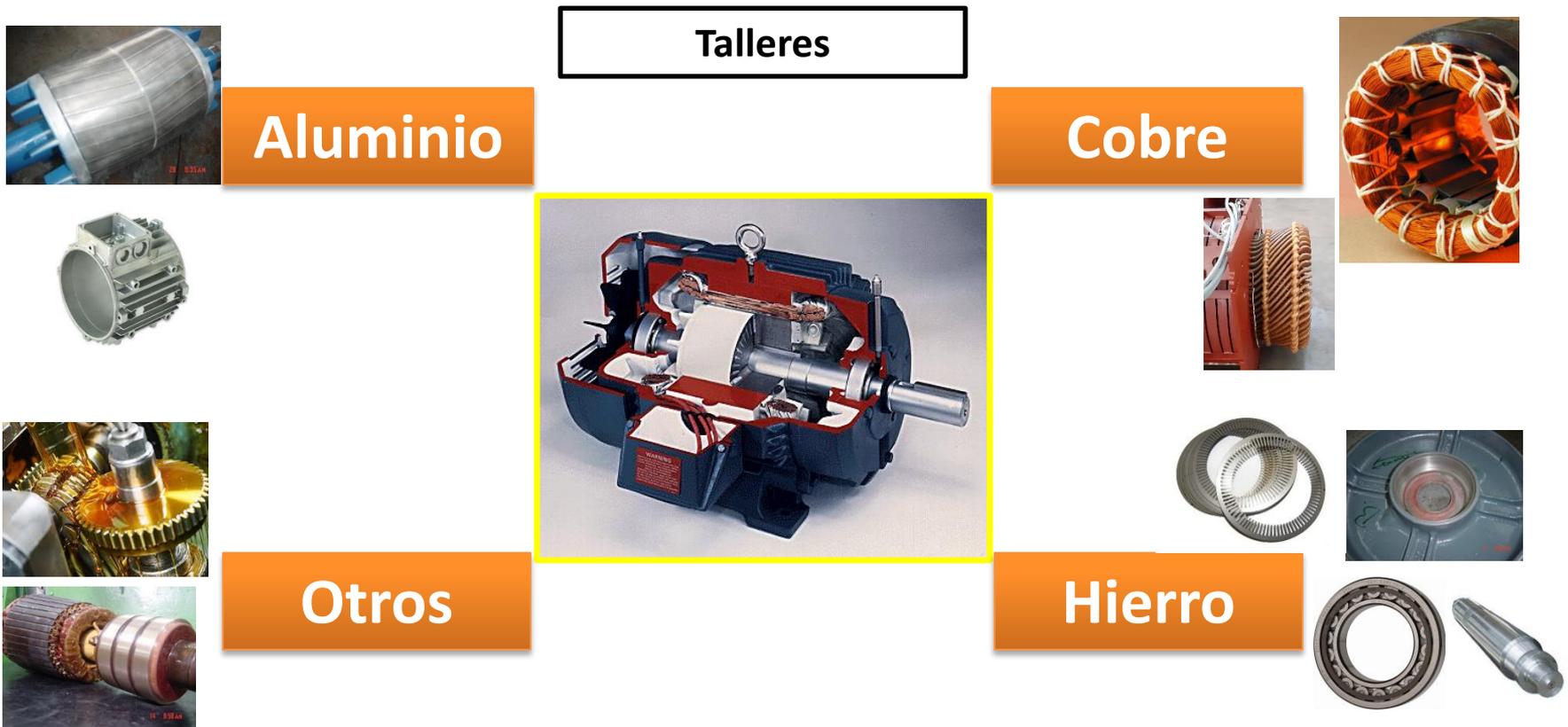
## 2. Planteamiento del problema

### El papel de los Centros de Servicio (Talleres)



## 2. Planteamiento del problema

### Materiales recuperados (reparación/dado de baja)

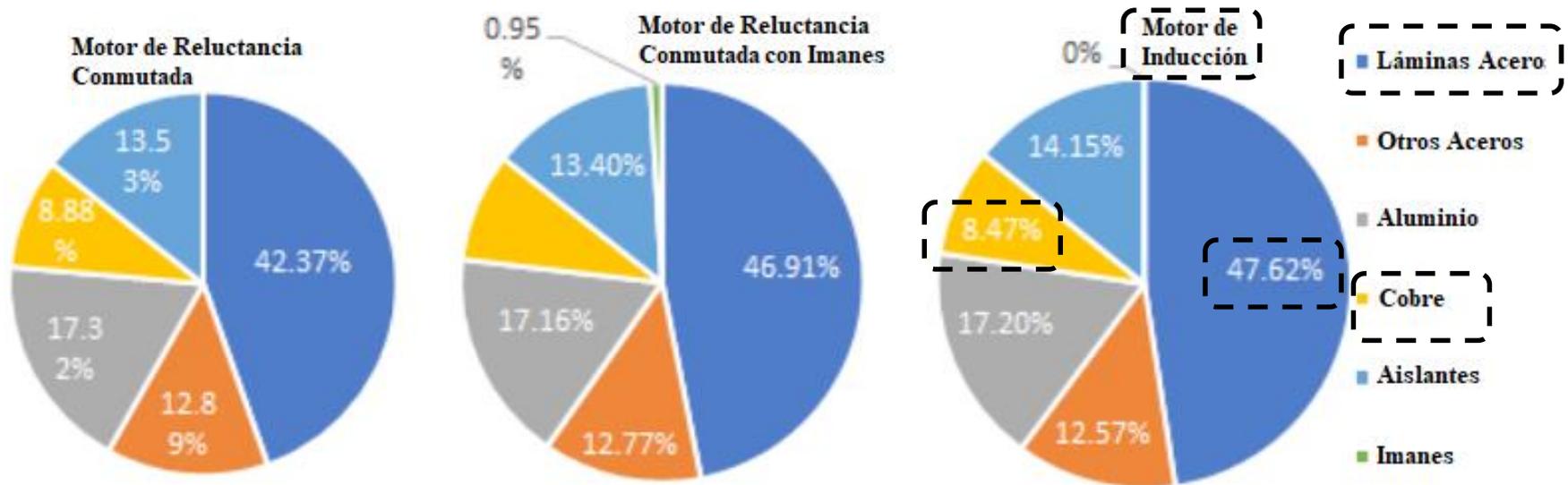


Cantidad material depende de tipo/tamaño, y falla: se entregan a **empresas recicladoras**

## 2. Planteamiento del problema

### Materiales utilizados (ejemplo)

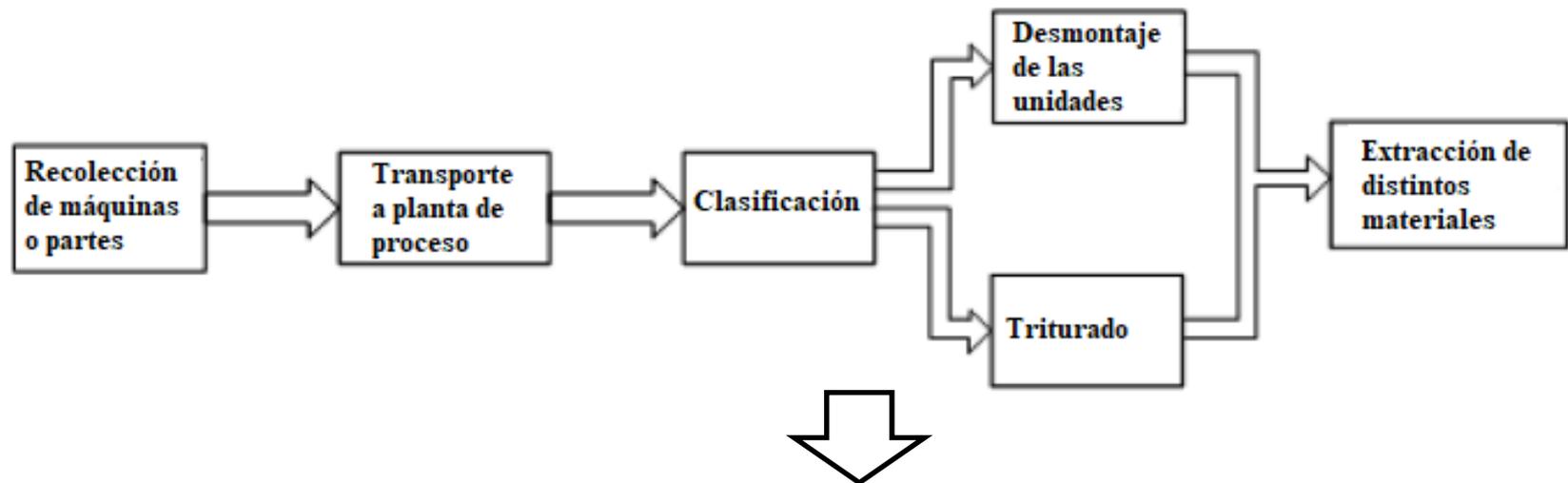
- Porcentaje del costo de las materias primas para tres tipos de motores eléctricos industriales.
- Basado en un motor de potencia 10 kW.



## 2. Planteamiento del problema

### Reciclaje de materiales de los motores

- Hay dos métodos principales para el reciclaje de partes de motores eléctricos: i) *triturado*; y, ii) *desmantelamiento*.
- Comprende el siguiente proceso inicial (posteriores procesos pueden/o no ser requeridos):

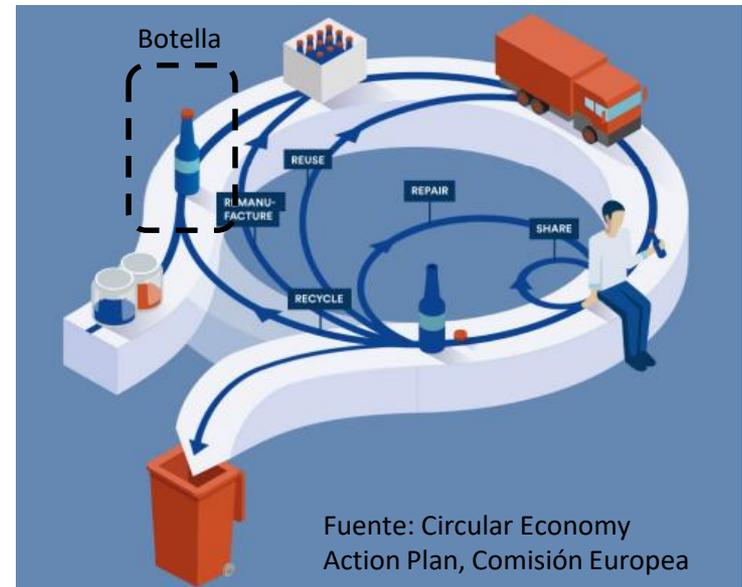


*La industria de la reparación de motores propone que esto sea parte de lo que implica el concepto de la **Economía Circular***

### 3. Economía circular

## Definición desde la industria de motores

- **Economía Circular** tiene como objetivo "minimizar residuos mediante el diseño, la reutilización, reparación, restauración y reciclaje de materiales y productos".
- **Ideas** que pueden ser útiles: *i)* uso correcto de materiales; *ii)* fabricación con posibilidades de reparar y/o reciclar.
- **Importante cuestión:** durabilidad del producto y la necesidad de reducir el consumo de materiales.



Asociaciones de reparadores de máquinas:



Inglaterra



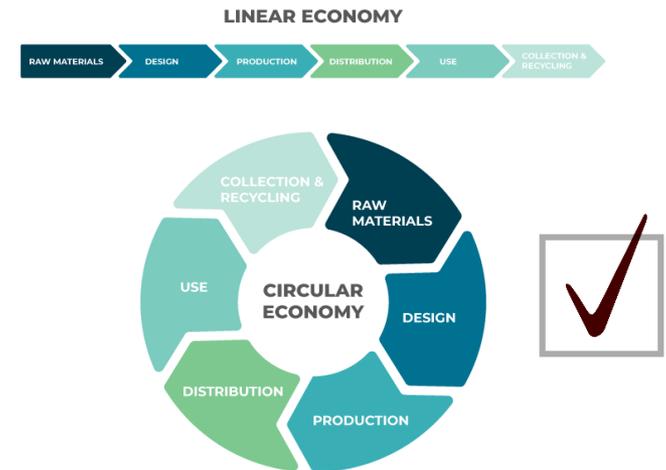
USA

# 3. Economía circular

## Beneficios y cambio de paradigma

- **Más trabajos** locales y mejor calificados.
- **Menos importaciones** y, por tanto, mejor balanza de pagos (para el país).
- **Exportación** de servicios.
- **Menor exposición** a precios de materiales fluctuantes o escasez de material/equipos.

### Cambio de paradigma:



# 3. Economía circular

## Aplicación a los motores eléctricos (fabricantes)

- En **Europa** se están dando los primeros pasos sobre el tema.
- En 2016, el **Comité Europeo** de Fabricantes de Máquinas Eléctricas y Electrónica de Potencia se pronunció positivo sobre la **Economía Circular**.
- **Cautelosos** de que una nueva regulación debe considerar avances en la tecnología, y mantener un equilibrio entre eficiencia energética/confiabilidad, junto con consideraciones del uso de materiales.



*Economía Circular en motores eléctricos*

---

## 3. Economía circular

### La industria de la reparación de motores

---

---

- La **reparación de motores** surge en muchos sentidos “a la vanguardia”, al demostrar desde hace mucho tiempo cómo funciona la *Economía Circular* en la práctica.
- Hay **tres desafíos** que deben abordarse:
  1. ¿Cómo compartir el conocimiento/experiencias del sector con otros?
  2. ¿Cómo interactuar con otros organismos para que el sector de la reparación aprenda a mejorar sus procesos?
  3. ¿Cómo promover una posición de liderazgo?
- Este podría ser un **momento clave** para que la industria de la reparación mejore su perfil y demuestre su liderazgo.

# 3. Economía circular

## La industria de la reparación de motores (posibilidades)

### Bobinado (eléctrica):

- Optimizar el voltaje.
- Mejoras materiales de aislamiento.
- Optimizar el llenado de la ranura.**
- Incluir sensores de temperatura.
- Cambios en la conexión.
- Incluir calefactores.

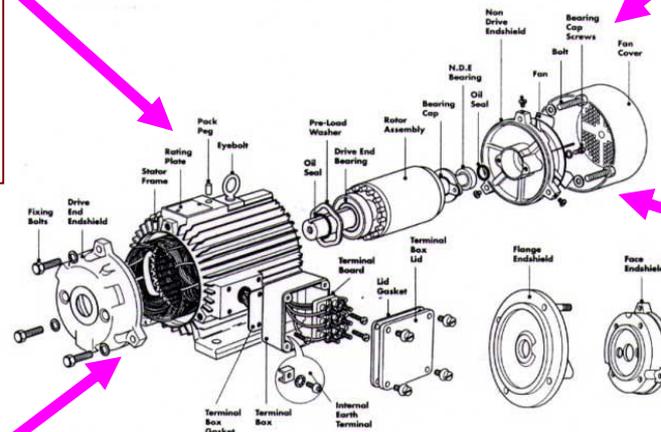
### Rodamientos:

- Cambios.
- Adicionar sellos.**
- Dispositivos lubricación.
- Escobilla aterrizamiento.

### Talleres

### Aspectos mecánicos:

- Fabricación de eje.
- Reparación carcasa o base.
- Materiales a utilizar.



### Otros cambios:

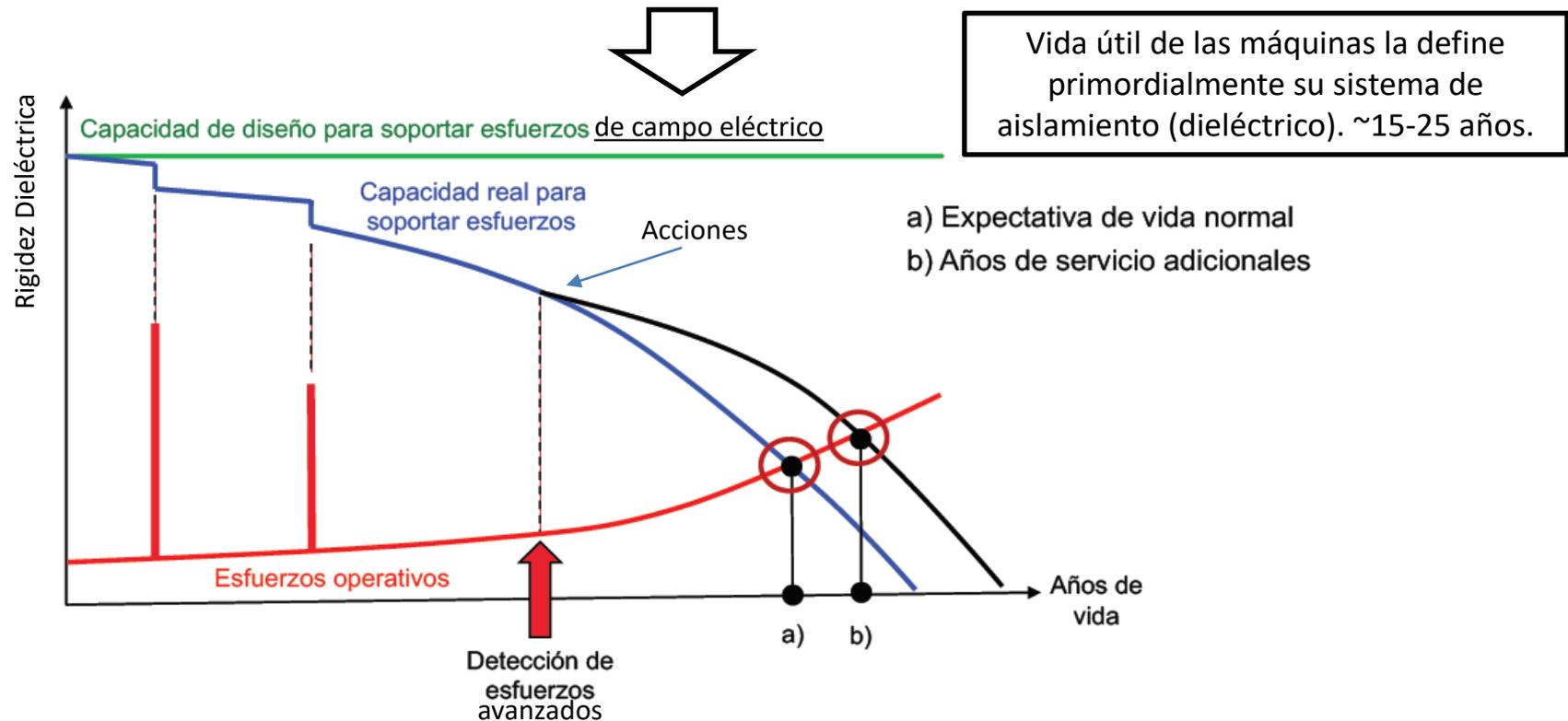
- Mejorar el grado protección.
- Protección contra la corrosión.
- Mejoras en la ventilación.

Rediseño eléctrico y mecánico: mejoras  
**eficiencia/confiabilidad**

# 4. Confiabilidad

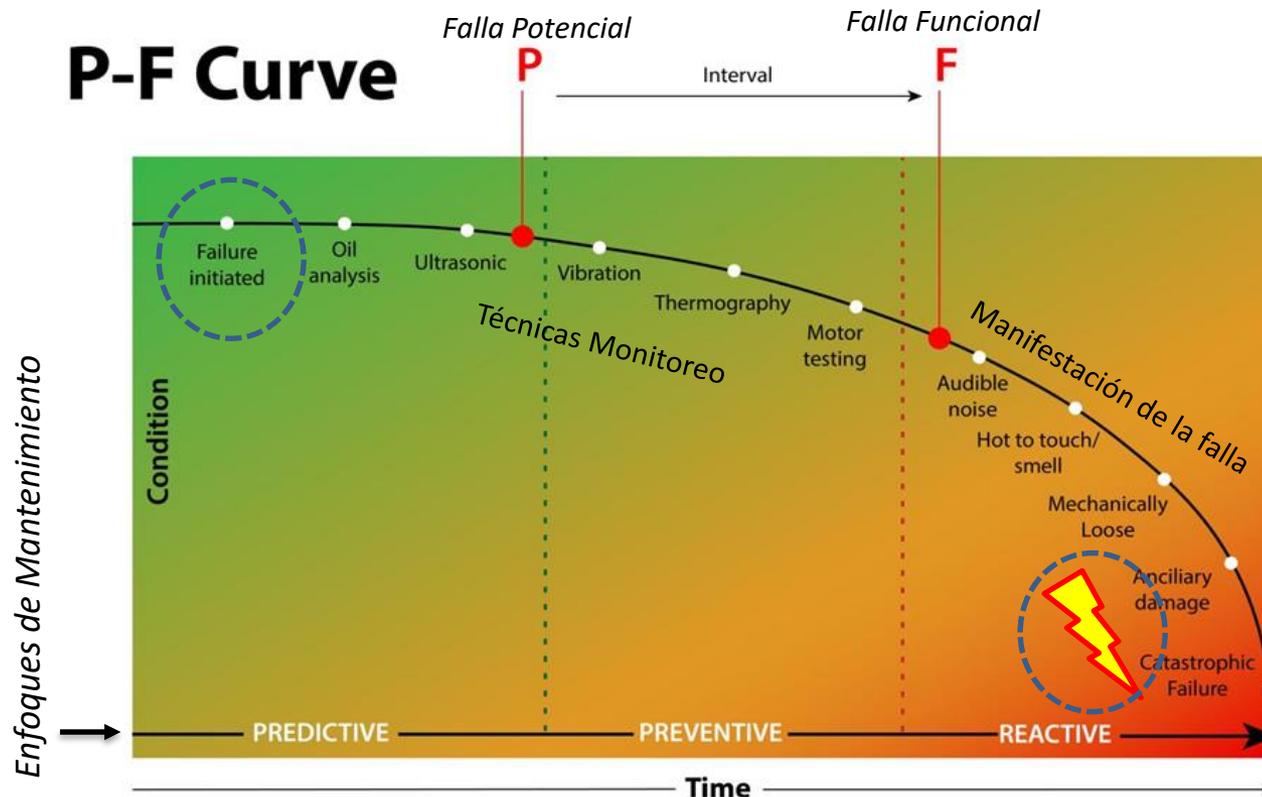
## Requerimientos

Confiabilidad: Capacidad de un equipo de mantenerse operando en un período de tiempo. Es un parámetro cuantificable.

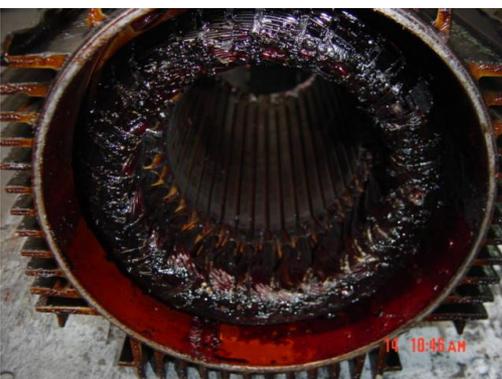


# 4. Confiabilidad

## Curva P-F (*técnicas de monitoreo*)



Ilustra la relación entre la **técnica de monitoreo** y la potencial **detección de la falla**, según un intervalo de tiempo previo a la falla funcional.



---

## 5. Análisis de ciclo de vida

### Definición ACV (propuesta para las máquinas)

---

- El **ACV** estudia los **aspectos ambientales** e **impactos potenciales** a lo largo de la vida de un producto (motor eléctrico).
- Considera toda la "**historia**" (desde su origen como materia prima, hasta su final como residuo).
- Tienen en cuenta todas las **fases** (transporte, preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, etc.).
- Incluye aspectos como la **energía** necesaria, así como el consumo **agua**.
- Es una "**contabilidad ambiental**" en la que se cargan a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados.
- Norma de referencia: **ISO 14044:2006** Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices.

# 5. Análisis de ciclo de vida

## Ejemplo aplicación a los motores eléctricos

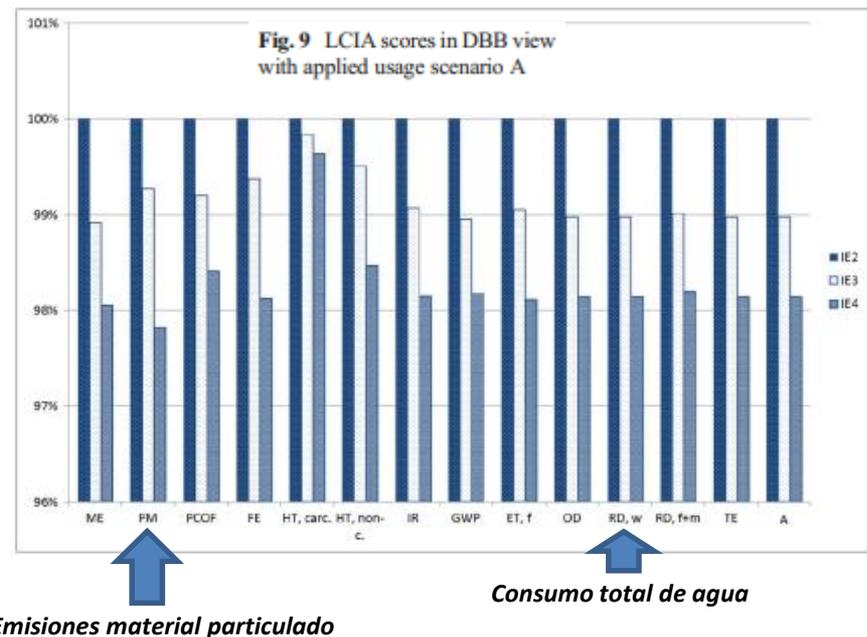
**Objetivo del estudio:** comparar los impactos ambientales potenciales de una familia de motores específica, con distintos niveles de eficiencia a lo largo de todo el ciclo de vida en el contexto actual **Europeo**, con directrices hacia el eco-diseño y la economía circular.

*Ej. entradas al modelo ACV:*

**Table 2** Material composition of the motors with different IE classes. The IE2 motor is the reference for the percentages displaying the increase for certain material groups when the efficiency is increased

Material group (assigned generic treatment processes)	IE2	IE3	IE4
Electric sheets (stamping)	271 kg	10%	10%
Cast iron (die casting)	271 kg	0%	0%
Copper (wire drawing)	69 kg	4%	10%
Other steel (stamping and bending)	64 kg	0%	0%
Packaging material (wooden pallet production)	24 kg	0%	0%
Aluminum (extruding)	19 kg	5%	5%
Impregnation resin	5 kg	20%	20%
Others: other materials with mass below 5 kg and no difference between the IE classes: Plastics (injection molding), insulation, paint (painting), rubber, brass (stamping and bending), solder (brazing), and grease	9.8 kg	0%	0%

*Ej. salidas al modelo ACV:*



---

## 5. Análisis de ciclo de vida

### Requerimientos adicionales para el ACV

---

---

- Que el diseño de motores incluya aumento de las posibilidades para reparación y reciclaje.
- Que las labores la reparación y mantenimiento del motor sean parte del ACV.
- Que se incluyan otros aspectos relacionados a la operación del motor, tales como: montaje, calidad del servicio eléctrico, equipos de transmisión de potencia mecánica, otros.

---

## 6. Caso de estudio

### Objetivo de la propuesta metodológica

---

---

1. Se requiere una herramienta que proporcione una base para evaluar el **estado** del motor (guiar la toma de decisiones).
2. Basado en la identificación de los **modos de falla** que pueden llevar al final de la vida útil del activo.
3. Los objetivos son:
  - A. Ser indicativo de la **idoneidad del activo** para el servicio continuo y representar su condición.
  - B. Utilizar distintas medidas **objetivas y verificables** de la condición del activo.
  - C. Ser **comprensible** y de **fácil interpretación** para los usuarios de motores.
4. Se propone así el cálculo de un **Índice de Salud**, que considere el grado relativo de los diferentes factores para su cálculo.

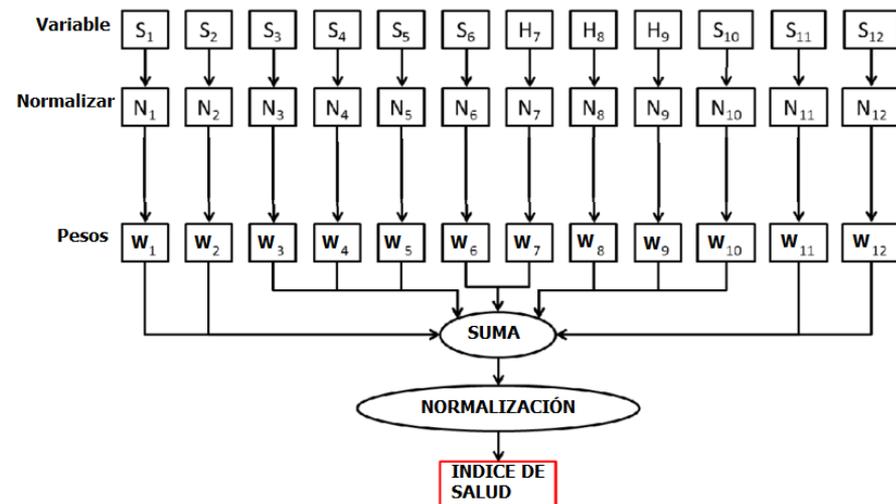
## 6. Caso de estudio

### Propuesta metodológica: *Índice de Salud Dieléctrico*

- El envejecimiento es un **fenómeno físico-químico** que se produce por los esfuerzos (*solicitud*) que operan.
- Dichos esfuerzos actúan de manera **simultánea**.
- Para comprender los procesos que conducen a la degradación del aislamiento, es necesario desarrollar un **modelo físico** que conecte la naturaleza y la magnitud de los diversos esfuerzos y el momento en que se produce una falla.



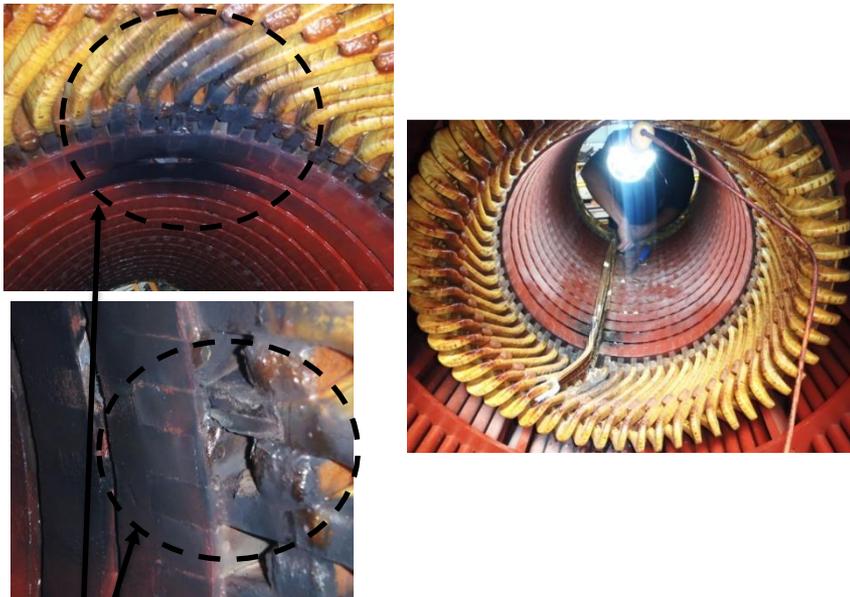
Un **ÍNDICE DE SALUD** busca recoger el modelo físico de degradación para evaluación y anticipación de fallas.



# 6. Caso de estudio

## Motor 900 kW, 4160 VCA

ANTES



Modo de falla:  
*Corto circuito  
entre fases*

Prueba realizada	Valor obtenido
Resistencia de aislamiento(40° C)	1032 MΩ
Razón de absorción dieléctrica	-
Índice de polarización	1.1
Comparación de Impulsos (Surge)	EAR.
	L1-L2= 10%
	L2-L3= 15%
	L1-L3= 17%

DESPUÉS



Prueba realizada	Valor obtenido
Resistencia de aislamiento(40° C)	9430 MΩ
Razón de absorción dieléctrica	-
Índice de polarización	3.3
Comparación de Impulsos (Surge)	EAR.
	L1-L2= 1%
	L2-L3= 0%
	L1-L3= 2%

# 6. Caso de estudio

## Resultados obtenidos *IS* y análisis

### Antes

Pruebas no realizadas	Peso de la prueba	Condición:Mala.	
Descarga dieléctrica	0.0477		
Factor de potencia	0.1179		
Tip Up	0.1179		
Descargas parciales	0.1875		
<b>Suma(+)</b>	0.47124		
<b>Valor a repartir</b>	0.15708		
Pruebas realizadas	Medición normalizada	Pesos parciales	Peso Finales
Resistencia de aislamiento (RA)	0.25490	0.25490	0.41198
Índice de polarización (IP)	0.2124	0	0
Prueba de comparación de impulsos (Surge)	0.03660	0	0
<b>Diagnóstico</b>		<b>Diagnóstico Final:</b> 41.198 %	
<b>Suma(+)</b>	0.4119		



### Después

Pruebas no realizadas	Peso de la prueba	Condición:Excelente.	
Descarga dieléctrica	0.0477		
Factor de potencia	0.1179		
Tip Up	0.1179		
Descargas parciales	0.1875		
<b>Suma(+)</b>	0.47124		
<b>Valor a repartir</b>	0.15708		
Pruebas realizadas	Medición normalizada	Pesos parciales	Peso Finales
Resistencia de aislamiento (RA)	0.25490	0.25490	0.41198
Índice de polarización (IP)	0.2124	0.22599	0.3747
Prueba de comparación de impulsos (Surge)	0.03660	0.03294	0.17431
<b>Diagnóstico</b>		<b>Diagnóstico Final:</b> 96.1037 %	
<b>Suma(+)</b>	0.9610		



---

## 7. Conclusiones

---

---

1. La industria de la reparación de máquinas eléctricas es un **actor clave** en los procesos de reutilización y reciclaje de materiales eléctricos.
2. Se deben emplear **metodologías de análisis** que den seguimiento a todos los procesos involucrados en la vida útil del motor, incluyendo su disposición final.
3. Mediante el estudio y realización de pruebas de campo, se logró crear, ajustar y obtener una herramienta que calcula **IS dieléctrico**, para dar soporte a los usuarios.



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# Reutilización y recuperación de materiales en las máquinas eléctricas: *consideraciones sobre análisis de ciclo de vida, confiabilidad y economía circular*

Gracias!!!!



*Jornadas de investigación gestión de residuos eléctricos y electrónicos*  
*Diciembre 2020*

EIE

Escuela de  
Ingeniería Eléctrica