

Universidad Internacional de La Rioja (UNIR)

Escuela de Ingeniería

**Máster Universitario en Diseño y Gestión de
Proyectos Tecnológicos**

Evaluación y optimización de la eficiencia energética de motores eléctricos de Renault

Trabajo Fin de Máster

Presentado por: Palacios Solórzano, Juan Pablo

Directora: Blanco Hernández, María

Ciudad: Quito - Ecuador

Fecha: 22 de julio de 2021

Resumen

La industria automotriz Renault está implementando medidas para el uso racional de la energía eléctrica, que impliquen ahorros energéticos y económicos, para lo cual requiere determinar la eficiencia energética de 300 motores eléctricos. En este contexto, se propone desarrollar una herramienta computacional que permita determinar la eficiencia energética de los motores eléctricos de inducción, empleando como datos de entrada las mediciones de parámetros eléctricos básicos de los motores eléctricos, es decir que el método sea lo menos invasivo. Se asume la hipótesis de que Francia adopta la clase de eficiencia IE3, por lo que los motores cuya eficiencia no cumpla esta categoría deberán ser sujetos a un análisis costo - beneficio para determinar si es ventajoso reemplazarlos por motores eficientes de la categoría IE3. Empleando la herramienta computacional propuesta, se ha determinado que es beneficioso para la industria reemplazar 165 motores ineficientes por motores de la categoría IE3, obteniéndose por ello un ahorro de 4,19 MM€.

Palabras Clave: Eficiencia energética, motores eléctricos, optimización heurística, uso racional de la energía.

Abstract

The Renault automotive industry is implementing measures for the rational use of electrical energy, which imply energy and economic savings, for which it requires determining the energy efficiency of 300 electric motors. In this context, it is proposed to develop a computational tool that allows to determine the energy efficiency of induction electric motors, using as input data the measurements of basic electrical parameters of electric motors, that is to say that the method is the least invasive. The hypothesis is assumed that France adopts the IE3 efficiency class, therefore motors whose efficiency does not meet this category should be subjected to a cost-benefit analysis to determine whether it is advantageous to replace them with efficient motors of the IE3 category. Using the proposed computational tool, it has been determined that it is beneficial for the industry to replace 165 inefficient motors with IE3 category motors, thus obtaining a saving of € 4.19 million.

Keywords: Energy efficiency, electric motors, heuristic optimization, rational use of energy.

Índice de contenido

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introducción | 7 |
| 1.1 | Motivación | 8 |
| 1.2 | Planteamiento del trabajo | 8 |
| 1.3 | Estructura del trabajo | 9 |
| 2 | Resumen de la propuesta | 10 |
| 2.1 | Descripción de la convocatoria | 10 |
| 2.2 | Resumen del proyecto | 11 |
| 2.2.1 | Contexto | 11 |
| 2.2.2 | Estado del Arte | 12 |
| 2.2.3 | Plan de Calidad | 21 |
| 2.2.4 | Análisis costo-beneficio del proyecto | 22 |
| 2.3 | Descripción del consorcio | 24 |
| 3 | Propuesta según el formato de la convocatoria | 26 |
| 3.1 | Objetivos | 26 |
| 3.2 | Relación con el programa marco | 27 |
| 3.3 | Concepto y metodología, calidad de la coordinación y medidas de soporte | 28 |
| 3.3.1 | Procedimiento de optimización | 30 |
| 3.4 | Impactos | 31 |
| 3.5 | Medidas para maximizar el impacto | 31 |
| 3.5.1 | Difusión y explotación de resultados | 31 |
| 3.5.2 | Actividades de comunicación | 33 |
| 3.6 | Implementación | 33 |
| 3.6.1 | Plan de trabajo – Paquetes de trabajo y entregables | 33 |
| 3.6.2 | Estructura de gestión y procedimientos | 45 |
| 3.6.3 | Plan de gestión de riesgos | 47 |
| 3.6.4 | Consorcio como un conjunto | 50 |
| 3.6.5 | Recursos a comprometer | 50 |
| 3.7 | Miembros del consorcio | 57 |
| 3.7.1 | Participantes | 57 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.8 | Ética y seguridad | 59 |
| 4 | Conclusiones y trabajo futuro..... | 61 |
| 4.1 | Principales conclusiones | 61 |
| 4.2 | Líneas de trabajo futuro..... | 62 |
| | Referencias bibliográficas..... | 63 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estator de un motor de inducción típico que muestra los devanados del estator ... | 13 |
| Figura 2. Dibujo de un rotor de jaula de ardilla | 14 |
| Figura 3. Diagrama de corte de un motor de inducción con rotor devanado..... | 14 |
| Figura 4. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción..... | 15 |
| Figura 5. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción | 16 |
| Figura 6. Eficiencia de clases para motores de 4 polos a 50 Hz..... | 18 |
| Figura 8. Esquema de la herramienta computacional..... | 30 |
| Figura 9. Diagrama PERT | 44 |
| Figura 10. Metodología de gestión propuesta..... | 45 |
| Figura 11. Estructura de gestión del proyecto | 46 |
| Figura 12. Porcentaje del presupuesto por participante..... | 57 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Clases de Eficiencia de Motores Eléctricos de Inducción según IEC 60034-30..... | 18 |
| Tabla 2. Aplicación de niveles de eficiencia en diferentes países..... | 19 |
| Tabla 3. Clases de Eficiencia de Motores Eléctricos de Inducción | 20 |
| Tabla 4. Resumen de resultados de las pruebas realizadas a los motores eléctricos..... | 22 |
| Tabla 5. Consumo y facturación estimados de motores eléctricos que no cumplen el índice IE3 | 23 |
| Tabla 6. Consumo y facturación estimados de motores eléctricos nuevos | 23 |
| Tabla 7. Análisis costo – beneficio cambio de motores | 24 |
| Tabla 8. Lista de participantes del consorcio..... | 25 |
| Tabla 9 Formato de recopilación de datos para aplicar programa de determinación de la eficiencia | 29 |
| Tabla 10. Descripción correspondiente al WP 1 | 35 |
| Tabla 11. Descripción correspondiente al WP 2 | 36 |
| Tabla 12. Descripción correspondiente al WP 3 | 37 |
| Tabla 13. Descripción correspondiente al WP 4 | 38 |
| Tabla 14. Descripción correspondiente al WP 5 | 39 |
| Tabla 15. Descripción correspondiente al WP 6 | 40 |
| Tabla 16. Diagrama de Gantt del proyecto | 41 |
| Tabla 17. Lista de paquetes de trabajo..... | 42 |
| Tabla 18. Listado de entregables | 42 |
| Tabla 19. Listado de hitos | 43 |
| Tabla 20. Matriz de responsabilidades | 47 |
| Tabla 21. Listado de riesgos identificados..... | 47 |
| Tabla 22. Nivel de riesgo detectado | 48 |

| | |
|---|----|
| Tabla 23. Tabla resumen del esfuerzo por participante | 50 |
| Tabla 24. Costes directos de personal de Renault | 52 |
| Tabla 25. Costes directos de personal de SGS..... | 53 |
| Tabla 26. Costes directos de personal de Siemens..... | 54 |
| Tabla 27. Otros costes directos de los miembros del consorcio | 55 |
| Tabla 28. Desglose presupuesto total | 56 |

1 Introducción

El uso eficiente y racional de la energía eléctrica es uno de los más importantes objetivos que buscan las industrias hoy en día. Ello permite realizar un cierto trabajo empleando un menor uso de energía eléctrica, promoviendo directamente ahorros por compra de energía eléctrica, y de manera indirecta la reducción de emisión de gases de efecto invernadero. En cuanto al uso final de la energía, el motor eléctrico de inducción desempeña un rol preponderante en el sector industrial, razón por la cual constituye un objetivo clave en el ahorro energético.

Entre los principales consumidores de energía eléctrica en el sector industrial a nivel mundial se destacan los motores eléctricos, específicamente los motores asincrónicos o de inducción, los que representan más del 70% de la carga eléctrica en las industrias (Instituto Costarricense de Electricidad, 2017). Por este motivo, el monitoreo in situ de la eficiencia de los motores eléctricos instalados, constituye una necesidad para la detección de aquellos que se encuentran trabajando con baja eficiencia, y así realizar las acciones necesarias.

La determinación de la eficiencia de los motores asincrónicos resulta complicada en condiciones bajo carga, además si se toman en cuenta los efectos del envejecimiento del motor, su reparación o rebobinado. Las normas IEEE Std-112-2004 ("IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," 2004) e IEC Std-60034-2-1 ("Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests," 2007), establecen los procedimientos requeridos para determinar con buena exactitud la eficiencia de los motores; sin embargo, no son aplicables en condiciones de campo, debido a su naturaleza altamente invasiva y al requerimiento de equipamientos y condiciones muy específicas. Por tal motivo, es necesario desarrollar un método y herramienta computacional, que permita realizar un análisis energético de los motores asincrónicos in situ, y que se caracterice por su baja invasividad, corto tiempo de fuera del servicio del motor, exactitud y pocos recursos materiales necesarios.

Con estos antecedentes se propone desarrollar e implementar un programa computacional basado en optimización heurística para la determinación de la eficiencia energética de motores eléctricos de la empresa automotriz Renault. Este programa computacional se empleará primeramente para determinar la eficiencia de los motores de la planta, y posteriormente para poder decidir qué motores serían sujetos de cambio por motores eléctricos de mayor eficiencia energética.

1.1 Motivación

La empresa automotriz Renault realiza excesivos pagos de facturas de energía eléctrica, por lo que resulta necesario identificar la causa de dicho problema. La literatura indica que los motores eléctricos son los equipos de mayor consumo de energía eléctrica en las instalaciones industriales, con aproximadamente entre el 60% y el 70% del consumo de energía eléctrica total (Instituto Costarricense de Electricidad, 2017). Por tal razón se requiere determinar los índices de eficiencia energética de todos los motores eléctricos de Renault. Dichos resultados servirán para determinar qué motores eléctricos requieren ser renovados por motores de mejor eficiencia y menor consumo de energía eléctrica. Estos resultados determinarán también qué motores tienen una buena eficiencia energética y pueden seguir operando en sus condiciones actuales. Por consiguiente, en este proyecto se plantea el desarrollo e implementación de una herramienta computacional para la determinación de la eficiencia energética de los motores eléctricos, para posteriormente evaluar técnica y económicamente qué motores requieren ser reemplazados por otros de mayor eficiencia.

1.2 Planteamiento del trabajo

El presente trabajo está planteado como Tipo 1, es decir, que corresponde a una propuesta de financiación. El proyecto está alineado con la convocatoria Energy Efficiency Call 2016 – 2017 (H2020-EE-2016-2017)¹ del programa de financiación europeo Horizonte 2020, explicada más adelante en el apartado 2.1, la que tiene como objetivo financiar programas de auditoría energética y de eficiencia energética en los sectores industriales y de servicios. Esta convocatoria pasada tuvo como fecha de apertura el 19/01/2017 y fecha de cierre el 07/06/2017.

Para poder cumplir con el objetivo de eficiencia energética para la industria Renault, en este proyecto será necesario realizar investigaciones para desarrollar una herramienta computacional capaz de determinar la eficiencia energética de los motores eléctricos. La citada herramienta computacional será indispensable para poder efectuar los análisis

¹ <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/ee-2017;callCode=null;freeTextSearchKeyword=energy%20efficiency;matchWholeText=true;typeCodes=0,1,2;statusCodes=31094501,31094502,31094503;programmePeriod=null;programCcm2Id=31045243;programDivisionCode=null;focusAreaCode=null;destination=null;mission=null;geographicalZonesCode=null;programmeDivisionProspect=null;startDateLte=null;startDateGte=null;crossCuttingPriorityCode=null;cpvCode=null;performanceOfDelivery=null;sortQuery=sortStatus;orderBy=asc;onlyTenders=false;topicListKey=topicSearchTablePageState>

técnicos-económicos de eficiencia energética. En este sentido, la propuesta de financiación está claramente alineada a la convocatoria citada en el anterior párrafo.

1.3 Estructura del trabajo

En el Capítulo 1 se presenta una introducción al presente trabajo. Aquí se presentan la motivación y el planteamiento del trabajo. Se ha planteado y justificado la necesidad de realizar un proyecto en el que se desarrolle una herramienta computacional que analice la eficiencia energética de los motores eléctricos de inducción de la industria Renault con miras a reducir sus costos de facturación del servicio eléctrico.

En el Capítulo 2 se presenta el resumen de la propuesta. En particular se describe la convocatoria H2020-EE-2016-2017, EE-15-2017 “Mejoramiento de las capacidades para la implementación actual de medidas de eficiencia energética en industrias y servicios”. Posterior a ello se presenta un resumen del proyecto, además en esta sección se presenta el contexto del proyecto y el estado del arte de los métodos computacionales para determinar la eficiencia energética de motores. Finalmente se describen los socios del consorcio del proyecto y sus responsabilidades. Adicionalmente, en este capítulo se incluyen las partes que son fundamentales en un proyecto y que no se piden en la convocatoria.

En el Capítulo 3 se presenta la propuesta del proyecto según el formato de la convocatoria. En este sentido, se desarrolla el proyecto siguiendo el formato que determina la convocatoria H2020 y su proceso de implementación. Además, se presenta el plan de trabajo del proyecto, que consiste en la organización de los paquetes de trabajo y la definición los socios responsables de su cumplimiento.

En el Capítulo 4 se presentan las conclusiones del trabajo realizado. Además, se presentan futuras líneas de trabajo que complementen el presente proyecto.

2 Resumen de la propuesta

La propuesta consiste en implementar una herramienta computacional para analizar la eficiencia energética de motores eléctricos de inducción del complejo industrial Renault, para posteriormente evaluar si los motores cumplen con el índice de eficiencia IE3 “Eficiencia Premium”. Si la evaluación costo-beneficio indica que los motores deben ser renovados entonces serán cambiados por motores nuevos. El beneficio del cambio de los motores será evaluado a lo largo de su vida útil, con la tarifa eléctrica vigente para el sector industrial.

2.1 Descripción de la convocatoria

La convocatoria elegida para este proyecto corresponde a la convocatoria “Energy Efficiency Call 2016-2017” EE-15-2017 “Mejoramiento las capacidades para la implementación de medidas de eficiencia energética en la industria y servicios”, dentro del programa “Energía Segura, Limpia y Eficiente” del programa de financiación europeo Horizonte 2020. Esta convocatoria tiene entre sus objetivos desarrollar investigaciones para mejorar la implementación de programas de eficiencia energética en la industria y servicios. Además, se sugiere que los proyectos presentados consideren los datos financieros y técnicos que permitan a los tomadores de decisión y financiadores tomar decisiones informadas sobre la implementación de las medidas de ahorro de energía identificadas.

Por otro lado, esta convocatoria tiene como finalidad incentivar la inversión en eficiencia energética para los sectores industriales y de servicios, los cuales pueden ocasionar importantes ahorros energéticos para la compañía y sociedad en conjunto. En este sentido, se puede financiar auditorías energéticas llevadas a cabo por expertos calificados o acreditados. Además, esta convocatoria está abierta a financiar programas de entrenamiento a personal en la temática de la eficiencia energética.

Se ha creado una línea presupuestaria única de 11 millones de euros para el tema EE-15-2017 “Mejoramiento las capacidades para la implementación de medidas de eficiencia energética en la industria y servicios”.

La relación del presente proyecto con el programa marco se desarrolla en el apartado 3.2.

Los criterios de elegibilidad y condiciones de admisión de la convocatoria son los siguientes:

1. Al menos tres personas jurídicas participarán en una acción;

2. Cada una de las tres entidades jurídicas estará establecida en un Estado miembro o país asociado diferente;
3. Las tres personas jurídicas serán independientes entre sí.

2.2 Resumen del proyecto

Dos partes fundamentales que debe recoger este apartado son los objetivos y metodología del proyecto. Por ser parte de la convocatoria de financiamiento, los objetivos del proyecto se presentan en el apartado 3.1, mientras que la metodología se presenta en el apartado 3.3.

2.2.1 Contexto

El sector industrial de los países desarrollados viene creciendo sostenidamente y en consecuencia el consumo energía eléctrica de dicho sector se ha vuelto muy importante (International Energy Agency, 2020). Esto ha contribuido además con el crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero. En respuesta al crecimiento del consumo de energía muchos países en el mundo, especialmente los países desarrollados, están implementando políticas y medidas de eficiencia energética para promover el uso sustentable de los recursos energéticos (World Energy Council, 2008).

Una importante medida para poder conocer la dinámica del uso de la energía eléctrica de una industria es a través de auditorías energéticas. Gracias a las auditorías energéticas se puede identificar en qué sectores de una industria se encuentra concentrado el uso de la energía eléctrica, en la búsqueda de oportunidades para disminuir el consumo sin desmejorar las prestaciones del servicio eléctrico. Los ahorros en energía eléctrica obtenidos, además de representar ahorros de dinero, permiten alcanzar un desarrollo sostenible con ventajas adicionales para el medioambiente y la salud humana, porque se disminuye el grado de contaminación del aire, del mar y de la tierra.

La eficiencia energética es el hecho de minimizar la cantidad de energía necesaria para satisfacer una demanda sin afectar a su calidad y supone la sustitución de un equipo por otro que, con las mismas prestaciones, consuma menos electricidad. No supone, por tanto, cambios en los hábitos de consumo, pero se consume menos energía ya que el consumo energético para llevar a cabo el mismo servicio es menor (Schallenberg et al., 2008).

Las medidas de carácter tecnológico para lograr el ahorro y la eficiencia energética se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Medidas de mejora de los procesos productivos y de los equipamientos en los procesos de generación de energía eléctrica, utilizando ciclos combinados y cogeneración en las centrales térmicas convencionales.
- Medidas de sustitución de fuentes de energías ineficientes como como el fuel oil por otros también fósiles, pero más eficientes y menos contaminantes como el gas natural o el diésel sintético, o por energías renovables, consiguiendo con estas tecnologías eliminar las emisiones contaminantes en la generación de electricidad.
- Medidas de sustitución de equipos, encaminadas a sustituir aparatos y equipos por otros más eficientes, como luminarias de bajo consumo, electrodomésticos más eficientes, y motores más eficientes.

Por lo tanto, este proyecto se clasifica como tecnológico, con medidas de sustitución de motores eléctricos ineficientes por motores eficientes.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés), ha propuesto un estándar para la clasificación de motores eléctricos según su nivel de eficiencia energética, lo que se presenta en el apartado 2.2.2.5. En este sentido, los países europeos, incluyendo a Francia han establecido la clase de eficiencia IE3 “Eficiencia Premium” de la IEC como su meta de eficiencia energética en motores eléctricos. Dicho estándar será empleado en este proyecto para clasificar a los motores en eficientes o ineficientes.

En la actualidad existen diversas técnicas y estándares para determinar la eficiencia energética de motores eléctricos. La principal barrera de estas técnicas consiste en que requieren de mediciones de parámetros eléctricos que requieren que se desmonte el motor eléctrico y se lo lleve a un laboratorio para realizarle pruebas. Para la consecución de la estimación de la eficiencia de motores eléctricos, en este proyecto se propone desarrollar una herramienta computacional que permita determinar la eficiencia energética de motores eléctricos usando algoritmos genéticos, con base a mediciones de parámetros eléctricos de fácil adquisición.

2.2.2 Estado del Arte

En este capítulo se presenta la teoría de las máquinas eléctricas de inducción y de su circuito equivalente. También se presenta las clases de eficiencia de motores eléctricos según el IEC. Finalmente se describen varias metodologías existentes para determinar la eficiencia de los motores eléctricos y se presenta el aporte esperado por efectos del desarrollo de la herramienta computacional propuesta, realizada en lenguaje Matlab.

2.2.2.1 El motor eléctrico de inducción

El motor eléctrico es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica de rotación por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estator y un rotor (Chapman, 2012).

Un motor de inducción tiene físicamente el mismo estator que una máquina síncrona, pero con un rotor de construcción diferente (Chapman, 2012). En la Figura 1 se muestra un típico estator con dos polos. Se parece (y es igual) al estator de una máquina síncrona. Hay dos tipos diferentes de rotores de motores de inducción que pueden utilizarse dentro del estator. Uno se llama *rotor de jaula de ardilla* y el otro se conoce como *rotor devanado*. En la Figura 2 se muestra un rotor tipo jaula de ardilla de los motores de inducción. Éstos constan de una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras labradas en la cara del rotor y en cortocircuito en alguno de sus extremos mediante grandes anillos de cortocircuito. A este diseño se le llama rotor de jaula de ardilla porque los conductores, si se examinan por sí solos, parecen una de las ruedas de ejercicio donde corren las ardillas o hámsters.

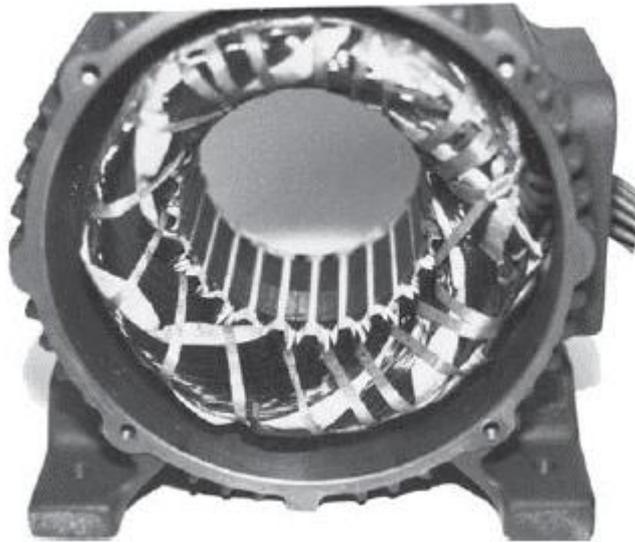


Figura 1. Estator de un motor de inducción típico que muestra los devanados del estator

Fuente: (Chapman, 2012)

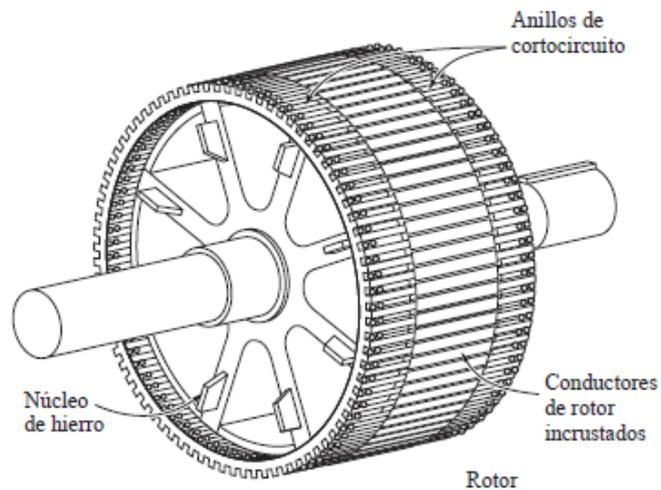


Figura 2. Dibujo de un rotor de jaula de ardilla

Fuente: (Chapman, 2012)

El otro tipo de rotor es un rotor devanado. Un rotor devanado tiene un conjunto completo de devanados trifásicos que son imágenes especulares de los devanados del estator. Por lo general, las tres fases de los devanados del rotor están conectadas en Y, y los extremos de los tres alambres del rotor están unidos a los anillos rozantes en el eje del rotor. Los devanados del rotor están en cortocircuito por medio de escobillas montadas en los anillos rozantes. Por lo tanto, los rotores devanados de los motores de inducción tienen corrientes en el rotor accesibles en las escobillas del estator, donde se pueden examinar y donde es posible insertar una resistencia extra en el circuito del rotor. Se puede sacar ventaja de este hecho para modificar la característica par-velocidad del motor. En la Figura 3 se muestra un motor de inducción de rotor devanado. Nótese las escobillas y anillos rozantes. También nótese que los devanados del rotor están sesgados para eliminar los armónicos de ranura (Chapman, 2012).

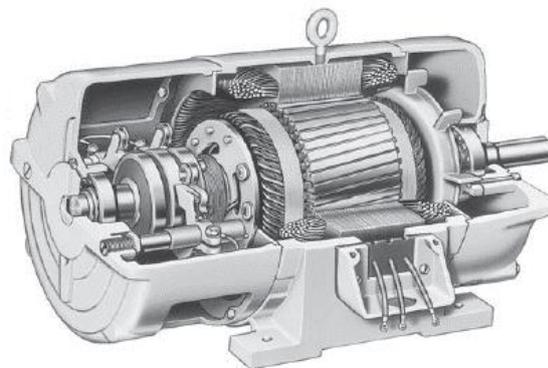


Figura 3. Diagrama de corte de un motor de inducción con rotor devanado.

Fuente: (Chapman, 2012)

Para su operación, los motores de inducción dependen de la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor desde el circuito del estator (acción transformadora). Puesto que la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor de un motor de inducción es esencialmente una operación transformadora, el circuito equivalente de un motor de inducción será muy similar al circuito equivalente de un transformador.

2.2.2.2 Circuito equivalente del motor de inducción

En la Figura 4 se muestra el circuito equivalente por fase de un motor de inducción, en donde (Chapman, 2012):

V_ϕ : Tensión en el estator (V)

R_1 : Resistencia del estator (Ω)

X_1 : Reactancia de dispersión del estator (Ω)

R_2/s : Resistencia del rotor (Ω)

X_2 : Reactancia de dispersión del rotor (Ω)

X_M : Reactancia de magnetización (Ω)

R_C : Resistencia representativa de las pérdidas del núcleo, de fricción y batimiento (Ω)

s : Deslizamiento (adimensional)

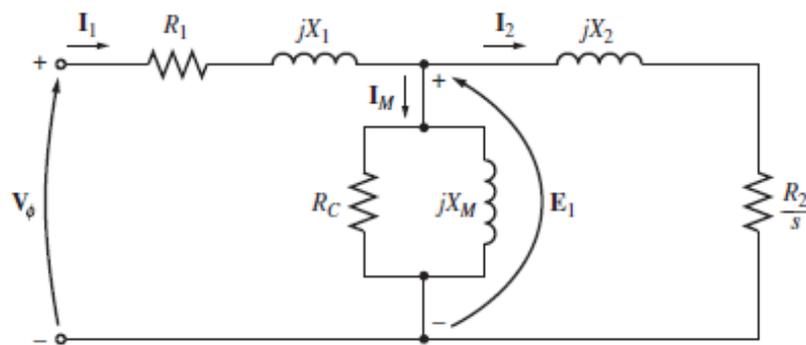


Figura 4. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción

Fuente: (Chapman, 2012)

La *velocidad de deslizamiento* se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor (Chapman, 2012):

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m$$

n_{des} : velocidad de deslizamiento de la máquina

n_{sinc} : velocidad de los campos magnéticos

n_m : velocidad mecánica del eje del motor

El otro término que se utiliza para describir el movimiento relativo es el de *deslizamiento* “s”, que es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje (Chapman, 2012). Esto quiere decir que el deslizamiento se define como

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}}$$

2.2.2.3 Pérdidas y diagrama de flujo de potencia

Se puede describir a un motor de inducción básicamente como un transformador rotatorio. Su entrada es un sistema trifásico de voltajes y corrientes. En un transformador ordinario, la salida es la potencia eléctrica de los devanados secundarios. Los devanados secundarios de un motor de inducción (el rotor) están en cortocircuito, por lo que no hay salida de electricidad de los motores normales de inducción. En cambio, la salida es mecánica. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida del motor se muestra en el diagrama de flujo de potencia de la Figura 5 (Chapman, 2012).

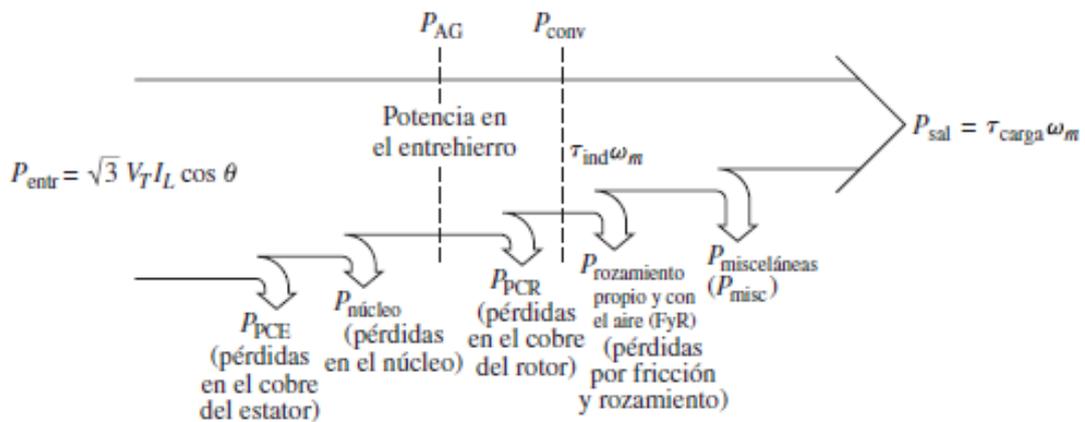


Figura 5. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción

Fuente: (Chapman, 2012)

La potencia de entrada de un motor de inducción P_{entr} se presenta en forma de voltajes y corrientes eléctricas trifásicas. Las primeras pérdidas que se encuentran en la máquina son las pérdidas I^2R en los devanados del estator (las pérdidas en el cobre del estator P_{PCE}). Luego se pierde cierta cantidad de potencia por la histéresis y las corrientes parásitas del estator ($P_{núcl}$). La potencia restante en este punto se transfiere al rotor de la máquina a

través del entrehierro entre el estator y el rotor. Esta potencia se llama potencia en el entrehierro P_{EH} de la máquina. Una vez que se transfiere la potencia al rotor, una parte de ella se elimina en pérdidas I^2R (las pérdidas en el cobre del rotor P_{PCR}) y el resto se convierte de su forma eléctrica a mecánica (P_{conv}). Por último, se restan las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire P_{FyR} y las pérdidas misceláneas P_{misc} . La potencia restante es la salida del motor P_{sal} .

2.2.2.4 Estándares de Eficiencia Energética en Motores Eléctricos

Los motores eficientes ayudan a reducir los costos de energía y limitar las emisiones de dióxido de carbono. Se ha estimado que la electricidad los motores representan alrededor del 65 por ciento de la electricidad consumido en aplicaciones industriales, por lo que el ahorro potencial de energía en las industrias es enorme (Sousa, 2014).

El consumo depende de la potencia en kW del motor, carga y horas de funcionamiento. Los motores de alta eficiencia como tales pueden desempeñar un papel importante en la reducción de emisiones de CO₂.

2.2.2.5 Clases de eficiencia IEC

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés) ha introducido normas relacionadas con motores energéticamente eficientes. El estándar IEC 60034-2-1 ("Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests," 2007) especifica reglas relativas a métodos de prueba de eficiencia y el estándar IEC 60034-30 ("Efficiency Classes of Single-Speed, Three-Phase, Cage-Induction Motors," 2008) define clases de eficiencia para una amplia gama de motores eléctricos conectados directamente en línea. El estándar IEC 60034-30-1 ("Efficiency Classes of Line Operated AC Motors (IE Code)," 2014), que se convierte en válido en 2014, da un paso más en la ampliación del alcance de los motores sujetos a clases de eficiencia e introduce la clase IE4.

El estándar IEC 60034-30-1 define cuatro clases de Eficiencia Internacional (IE por sus siglas en inglés) para todos los motores eléctricos que operan a voltajes sinusoidales, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clases de Eficiencia de Motores Eléctricos de Inducción según IEC 60034-30.

| | |
|--------------------------|-----|
| Eficiencia estándar | IE1 |
| Alta eficiencia | IE2 |
| Eficiencia premium | IE3 |
| Eficiencia super premium | IE4 |

Fuente: Elaboración propia a partir de IEC 60034-30

El alcance de esta norma es más amplio que el de IEC 60034-30. La norma IEC 60034-30-1 cubre no solamente motores estándar de hasta ocho polos, sino también motores marinos, y motores de frenado. Se excluyen, entre algunas otras excepciones, sistemas de accionamiento de potencia y motores completamente integrados a una aplicación o convertidor de frecuencia (ABB, 2014).

En la Figura 6 se muestra la correlación entre la eficiencia requerida y la potencia de salida para las 4 clases de eficiencia.

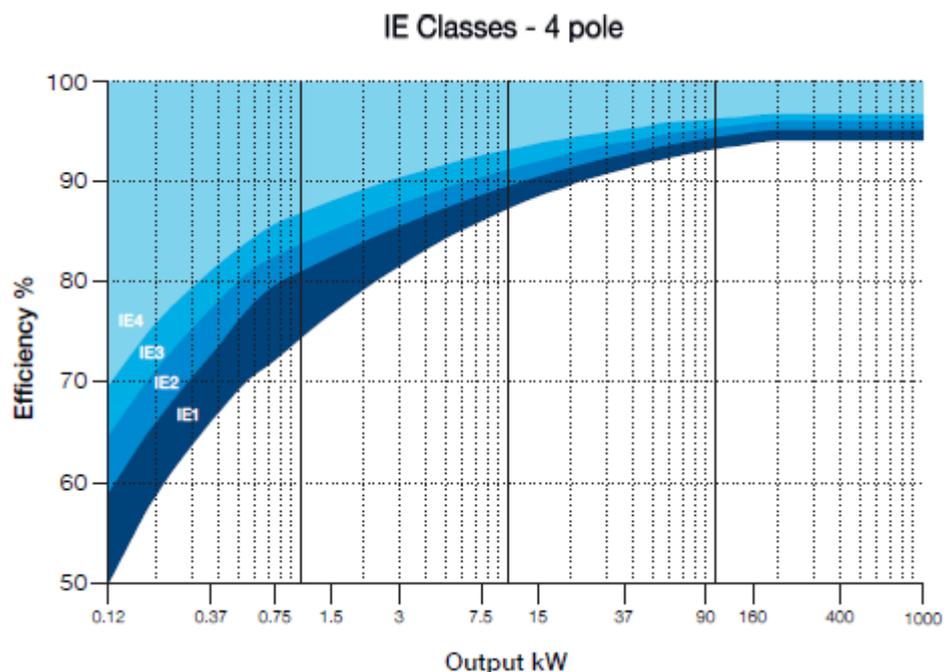


Figura 6. Eficiencia de clases para motores de 4 polos a 50 Hz

Fuente: (ABB, 2014)

2.2.2.6 Clases de eficiencia adoptadas por diferentes países

Aunque los estándares de eficiencia IEC son relevantes internacionalmente, las diferencias en la implementación todavía existen. En la Tabla 2 se muestra la correlación entre clases

de eficiencia IE y esquemas regionales de eficiencia en diferentes partes del mundo (ABB, 2014). Hay que tener en cuenta que IE1, "eficiencia estándar", se ha vuelto deficiente en todas las regiones mencionadas, y aún no hay plazos imperativos para establecer el IE4 a nivel regional.

Tabla 2. Aplicación de niveles de eficiencia en diferentes países

| IEC 60034-30-1 | IE2 - alta eficiencia | IE3 – eficiencia Premium |
|----------------|---|--|
| Australia | Nivel requerido | Adopción como estándar bajo discusión. |
| Brasil | Nivel requerido | - |
| Canadá | Nivel requerido para motores de 201-500 HP (caballos de fuerza), y motores de 8 polos | Nivel requerido para motores de 1-200 HP (caballos de fuerza) |
| China | Nivel requerido | - |
| Unión Europea | Nivel requerido | Nivel requerido para motores de 7,5 – 375 kW desde el año 2015 |
| Korea | Nivel requerido para motores de 2 - 8 polos | Nivel requerido para motores de 2 - 8 polos desde el año 2017 |
| México | Nivel requerido | Se espera que se adopte IE3 en el futuro |
| USA | Nivel requerido para motores de 201-500 HP de 2 - 6 polos | Nivel requerido para motores de 1-200 HP de 2 - 6 polos |

Fuente: (ABB, 2014)

El estándar IEC 60034-30-1 solo define los requisitos para las clases de eficiencia y crea una base para la coherencia internacional. Sin embargo, no especifica qué motores debe suministrarse con qué nivel de eficiencia. Esto se deja a las respectivas legislaciones regionales. Para este trabajo se asumirá que en Francia la legislación adopta el nivel de eficiencia IE3 para motores eléctricos de inducción. Además, se asume que los motores analizados tienen 4 polos, es decir que giran a una velocidad de 1800 rpm nominales.

2.2.2.7 Métodos para la evaluación de la eficiencia energética de los motores eléctricos

Como se citó anteriormente, el estándar IEC 60034-2-1 especifica reglas relativas a métodos de prueba de eficiencia, pero para su aplicación se requieren condiciones y ambientes de laboratorio. Por ello han surgido métodos más prácticos para determinar la eficiencia de los motores eléctricos, los cuales se enuncian a continuación:

- 1) Método del deslizamiento
- 2) Método de la corriente.
- 3) Métodos computarizados.
- 4) Método del momento en el entrehierro.

Tabla 3. Clases de Eficiencia de Motores Eléctricos de Inducción

| Método | Características |
|--------------------------|--|
| Método del deslizamiento | Este método supone que el deslizamiento del motor cambia linealmente con la carga (Holmquist et al., 2004). Es de fácil aplicación y tiene bajo nivel de invasividad, pero no proporciona buena exactitud en los resultados (Gharakhani, 2012). |
| Método de la corriente | Este método asume que la corriente de entrada del motor cambia linealmente con la carga. Es poco invasivo y no es necesario sacar el motor de servicio pues se utilizan amperímetros de gancho. La suposición de linealidad de la corriente con la carga trae consigo, que se trabaje con una característica recta en que la carga estimada siempre será mayor que la real (Hsu et al., 1996). |
| Métodos computarizados | <p>- ORMEL 96 (Kueck, 1996). Este programa utiliza el método del circuito equivalente para estimar la carga y la eficiencia de un motor en servicio. El uso de datos empíricos tales como la corriente a rotor bloqueado y de los valores nominales de eficiencia y deslizamiento para la estimación de los parámetros, degrada significativamente la exactitud de los resultados.</p> <p>- MotorMaster+ (U.S. Department of Energy, 2011). El programa es notable por su flexibilidad, baja invasividad y fácil uso. La estimación del factor de carga y la eficiencia se</p> |

| | |
|--------------------------------------|---|
| | <p>fundamenta en los datos de placa y de operación. Este programa no considera el efecto de la distorsión armónica y el desbalance en la tensión de alimentación, por lo que es poco preciso bajo estas condiciones.</p> <p>- Ontario Hydro (Ontario Hydro, 1990). Este método es una versión simplificada del método de segregación de pérdidas, y aunque es de fácil aplicabilidad en condiciones de campo, su exactitud es baja debido al uso de valores empíricos de las pérdidas rotacionales en vacío (Gharakhani, 2012).</p> |
| Método del momento en el entrehierro | <p>Este método consiste en la determinación de la eficiencia del motor a partir de la ecuación del momento en el entrehierro descrita en (Lu et al., 2008). En este método la forma en que se mide la resistencia en el estator, así como las aproximaciones en las pérdidas del núcleo y las pérdidas adicionales, traen consigo varias dificultades (Siraki & Pillay, 2012).</p> |

Fuente: Elaboración propia

Una solución para poder estimar la eficiencia energética de los motores eléctricos es a través del desarrollo de una herramienta computacional basada en técnicas de optimización heurística, que emplea ciertas mediciones de parámetros de los motores que son de fácil adquisición. La ventaja de emplear el modelo propuesto es que la adquisición de las mediciones se las puede realizar in situ, es decir que no es necesario desmontar los motores para llevarlos a un laboratorio a realizarle pruebas. El modelo propuesto requiere de un número reducido de datos de fácil adquisición en las mediciones del motor tales como, la resistencia del estator, el voltaje, la corriente, la velocidad, el factor de potencia y la potencia eléctrica. Además, este modelo requiere del circuito equivalente del motor de inducción que brinda precisión en los resultados. Para resolver el problema de optimización, se podrían emplear diferentes técnicas heurísticas tales como algoritmos genéticos (Zamboti Fortes et al., 2013), algoritmos genéticos adaptativos (Abdelhadi et al., 2004), algoritmos evolutivos (Subramanian & Bhuvaneshwari, 2006) y evolución diferencial (Ursem & Vadstrup, 2003).

2.2.3 Plan de Calidad

Con la finalidad de asegurar la calidad del presente proyecto, es necesario que se cumpla con ciertos márgenes de calidad, que vienen dados a través de ciertas métricas, y se recogen en el presente Plan de Calidad.

En relación a la definición de procesos contractuales, este proyecto cuenta con 3 socios y en este sentido deberán existir acuerdos entre ellos en los que se definirán las condiciones bajo las cuales colaborarán, así como las fechas de inicio y finalización de la colaboración, y definición de miembros que coordinarán la participación por cada socio. También los socios deberán suscribir acuerdos de confidencialidad.

2.2.4 Análisis costo-beneficio del proyecto

En esta sección se realizará una estimación del análisis costo-beneficio por el reemplazo de motores ineficientes por motores de clase de eficiencia IE3, posterior a la realización de análisis utilizando la herramienta computacional desarrollada. La determinación de la eficiencia de los motores eléctricos se realizó mediante la herramienta computacional presentada en el apartado 3.3.1. En la Tabla 4 se resumen los análisis realizados en los 300 motores empleando la herramienta computacional. Se ha podido determinar que 188 de ellos no cumplen con niveles del índice IE3.

Tabla 4. Resumen de resultados de las pruebas realizadas a los motores eléctricos

| Potencia Nominal (kW) | Número de motores | No cumplen IE3 | Niveles IE3 | Eficiencia energética promedio en motores que no cumplen IE3 | Diferencia |
|-----------------------|-------------------|----------------|-------------|--|------------|
| 5-10 | 42 | 19 | 93% | 82% | 11% |
| 10-50 | 84 | 65 | 94% | 86% | 8% |
| 50-150 | 135 | 81 | 97% | 90% | 7% |
| 150-300 | 39 | 23 | 98% | 94% | 4% |
| Total | 300 | 188 | | | |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 se resumen los consumos y facturación estimados de todos los motores eléctricos que no cumplen con el índice IE3. El factor de utilización indica la cantidad de uso que se les da a los motores eléctricos. Por ejemplo, si un factor de utilización es 100% significa que el motor está operativo todo el tiempo. Con el factor de utilización, con la eficiencia energética y con el número de motores se calcula la energía consumida anual. De acuerdo a (Données et études statistiques, 2019), el precio de la energía eléctrica para el sector industrial en Francia es de 10,5 ¢€/kWh. Este dato será utilizado para estimar la facturación del servicio eléctrico de Renault.

Tabla 5. Consumo y facturación estimados de motores eléctricos que no cumplen el índice IE3

| Potencia Nominal (kW) | Factor de Utilización | Eficiencia energética promedio en motores que no cumplen IE3 | Energía consumida anual (kWh) | Facturación por energía consumida anual motores ineficientes (€) |
|-----------------------|-----------------------|--|-------------------------------|--|
| 5-10 | 65% | 82% | 989.506 | 103.898 |
| 10-50 | 75% | 86% | 14.897.093 | 1.564.195 |
| 50-150 | 80% | 90% | 63.072.000 | 6.622.560 |
| 150-300 | 45% | 94% | 21.701.968 | 2.278.707 |
| TOTAL | | | 100.660.567 | 10.569.360 |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6 se muestra la estimación de consumo y facturación de los motores nuevos que reemplazarían a los motores que no cumplan con el índice IE3. El consumo y facturación han sido calculados como en la tabla anterior. En la Tabla 6 se muestra el ahorro en facturación por el cambio de motores eléctricos ineficientes por motores eléctricos con índices de eficiencia IE3.

Tabla 6. Consumo y facturación estimados de motores eléctricos nuevos

| Potencia Nominal (kW) | Factor de Utilización | Niveles IE3 | Energía consumida anual (kWh) | Facturación por energía consumida anual motores eficientes (€) | Ahorro facturación anual de energía (€) |
|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------------------------|--|---|
| 5-10 | 65% | 93% | 872.468 | 91.609 | 12.289 |
| 10-50 | 75% | 94% | 13.629.255 | 1.431.072 | 133.123 |
| 50-150 | 80% | 97% | 58.520.412 | 6.144.643 | 477.917 |
| 150-300 | 45% | 98% | 20.816.173 | 2.185.698 | 93.008 |
| TOTAL | | | 93.838.309 | 9.853.022 | 716.337 |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7 se muestran los cálculos de los precios de compra de los motores eléctricos. En otra columna se muestran los ahorros en facturación a lo largo de la vida útil de los motores eléctricos que es aproximadamente 10 años. Con los precios de compra de los motores y los ahorros obtenidos por el cambio de motores se ha calculado la relación costo-beneficio de los motores eléctricos. Los resultados indican que no es beneficioso realizar cambios en motores de alta capacidad de 150 - 300 kW, pues el costo de cambiarlos es mayor que los ahorros a obtenerse por dicho cambio. Para todos los demás motores se demuestra que es beneficioso su cambio por motores de mayor eficiencia, es decir que 165 motores estarían sujetos de cambio. El costo de cambiar los 165 motores sería de 2.038.500 €. Sin embargo, el beneficio neto por cambiar los 165 motores ineficientes durante su vida

útil es de 4.194.787 €, este valor corresponde a la diferencia entre el ahorro de facturación de energía durante la vida útil de los motores eléctricos y el costo de compra de los motores eficientes IE3.

Tabla 7. Análisis costo – beneficio cambio de motores

| Potencia Nominal (kW) | Precio Motor (€) | No cumplen IE3 | Precio total motores (€) | Ahorro facturación energía vida útil de energía (€) | Relación costo - beneficio |
|-----------------------|------------------|----------------|--------------------------|---|----------------------------|
| 5-10 | 1.500 | 19 | 28.500 | 122.890 | 23,2% |
| 10-50 | 6.000 | 65 | 390.000 | 1.331.230 | 29,3% |
| 50-150 | 20.000 | 81 | 1.620.000 | 4.779.167 | 33,9% |
| 150-300 | 45.000 | 23 | 1.035.000 | 930.084 | 111,3% |
| TOTAL | | 188 | 3.073.500 | 7.163.371 | 42,9% |

Fuente: Elaboración propia

2.3 Descripción del consorcio

El consorcio está conformado por 3 socios: la industria automotriz francesa Renault, la empresa consultora con sede en España SGS y la empresa alemana fabricante de motores eléctricos Siemens.

La empresa Renault es una empresa líder en la fabricación de vehículos en Francia, y tiene por sede la municipalidad de Boulogne-Billancourt. Tiene un parque industrial que ocupa una superficie de 6,20 Hectáreas y en el que operan alrededor de 300 motores eléctricos de inducción.

La consultora SGS tiene como sede la ciudad de Madrid en España. Esta empresa ha liderado al menos 10 consultorías relacionadas con eficiencia energética en motores eléctricos de inducción. En el proyecto, esta empresa consultora actuará como coordinadora del consorcio.

El Grupo Siemens AG es una corporación multinacional tecnológica alemana con sedes en Berlín y Múnich, con 190 sucursales a lo largo del mundo. Siemens se especializa en 4 sectores principales: el sector industrial, energético, de salud y de infraestructuras y ciudades.

Tabla 8. Lista de participantes del consorcio

| No. | Nombre | Logo | Acrónimo | País | ¿Pertenece a la UE? |
|-----|---------|---|----------|----------|---------------------|
| 1 | SGS |  | SGS | España | Sí |
| 2 | Renault |  | R | Francia | Sí |
| 3 | Siemens |  | S | Alemania | Sí |

Fuente: Elaboración propia

Cabe indicar que los tres participantes del consorcio son entidades reales, sin embargo, no se ha contactado realmente con las empresas indicadas. En el apartado 3.7 se presenta de manera más extensa los miembros del consorcio junto con sus roles en el proyecto.

3 Propuesta según el formato de la convocatoria

Siguiendo la plantilla del programa de financiamiento Horizonte 2020², en este apartado se indicarán los objetivos, tanto principales como específicos del proyecto. Se presentará la relación del programa marco y de la convocatoria con el proyecto presentado. Además, se presentará la metodología del proyecto, así como los impactos esperados y la implementación del proyecto.

3.1 Objetivos

Como objetivo general, se busca desarrollar una herramienta computacional para determinar la eficiencia energética de los motores eléctricos de la industria automotriz Renault, y tomar decisiones informadas sobre el reemplazo de motores ineficientes por motores eficientes de la categoría IE3. La herramienta computacional se implementará empleando el software Matlab, el mismo que posee un módulo de algoritmos genéticos, que facilitará la implementación.

Para poder conseguir este objetivo, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar una herramienta computacional basada en algoritmos genéticos para determinar la eficiencia energética de los motores eléctricos.
- Evaluar la eficiencia energética de los 300 motores eléctricos de Renault empleando la herramienta computacional desarrollada y determinar qué motores están operando bajo condiciones de eficiencia y cuáles no. El criterio para definir un motor eléctrico eficiente, será que cumpla el índice IE3.
- Estimar la facturación anual del servicio eléctrico, en función a las eficiencias eléctricas determinadas, considerando los motores ineficientes y considerando el reemplazo de motores ineficientes con motores que cumplan el índice IE3. En función a los resultados de facturación anual obtenidos, estimar los ahorros entre operar los nuevos motores eficientes Vs. operar los motores ineficientes.
- Evaluar el costo de compra de nuevos motores que cumplan el índice IE3 y analizar el costo - beneficio de cambiar los motores ineficientes con nuevos motores que cumplan el índice IE3.

² https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/call_ptef/pt/2016-2017/h2020-call-pt-csa-2016-17_en.pdf

3.2 Relación con el programa marco

Tal como lo requiere la convocatoria, en este apartado se presenta la relación del proyecto con el programa marco.

La convocatoria a la que se presenta este proyecto, es la llamada EE-15-2017 “Incremento de las capacidades para la implementación real de medidas de eficiencia energética en la industria y los servicios”, descrita anteriormente en el apartado 2.1. Esta convocatoria está dentro del marco CSA (*Coordination and support action*) y es de una sola etapa (*Single-stage*) y pertenece al programa de financiación de la Comisión Europea Horizonte 2020.

El objetivo de la convocatoria EE-15-2017 es promover las inversiones en eficiencia energética, en los sectores industriales y de servicios, que pueden generar importantes ahorros de energía, beneficiosos para la empresa y la sociedad en su conjunto. Estas medidas a menudo no se implementan debido a una combinación de factores y barreras que enfrentan los actores involucrados (empleados, tomadores de decisiones, auditores, empresas de servicios de energía (ESCOs), comunidad financiera, etc.).

Según la Directiva de Eficiencia Energética (European Commission, 2012), las grandes empresas están sujetas a auditorías energéticas obligatorias a menos que estén implementando un sistema de gestión energética o medioambiental, y se anima a las PYMES a someterse a auditorías energéticas en los próximos años. Esto representa una oportunidad para las inversiones en eficiencia energética.

Las propuestas deben centrarse en uno de los siguientes temas:

- Programas de desarrollo de capacidades para expertos calificados y/o acreditados que lleven a cabo auditorías energéticas para asegurar que incluyan los datos financieros y técnicos necesarios que permitan a los tomadores de decisiones y a financistas tomar decisiones informadas sobre la implementación de las medidas de ahorro de energía identificadas.
- Programas de capacitación y desarrollo de capacidades del personal para mejorar la política corporativa hacia la eficiencia energética, la cultura energética (motivaciones, cambio de comportamiento, mitigación de los riesgos y barreras percibidos) e iniciativas de cadena de suministro sostenible. Todos los actores (desde los tomadores de decisiones / miembros de la junta corporativa hasta los empleados de cada departamento, incluida la compra) deben ser el objetivo.

En cuanto al modelo de financiación, es de subvención 100%, y el presupuesto de esta convocatoria EE-15-2017 es de 11.000.000 €.

El presente proyecto se adapta a esta convocatoria en el sentido de que se promueve la inversión en eficiencia energética en el ámbito industrial. Uno de los aportes de este proyecto consiste en que se evalúa la eficiencia energética de los motores eléctricos a través de un método preciso de estimación in situ basado en el circuito equivalente del motor eléctrico y técnicas de optimización heurística, usando mediciones sencillas de parámetros eléctricos sin necesidad de desmontar los motores. Además, se realiza un análisis costo-beneficio para la toma de decisiones informadas en torno al reemplazo de motores ineficientes por motores de la categoría de eficiencia IE3. Mediante este análisis se justifica la adquisición de motores de la categoría IE3 cuando el ahorro energético y monetario es mayor que la compra de los motores eficientes.

3.3 Concepto y metodología, calidad de la coordinación y medidas de soporte

El concepto detrás del proyecto radica en el mejoramiento de la eficiencia energética, que consiste en producir un determinado producto o realizar un proceso industrial empleando menor cantidad de energía. Para ello, a través de una auditoría energética interna realizada por Renault, se ha identificado que los motores eléctricos son los aparatos que participan mayormente en el consumo de energía eléctrica, por lo que sería importante:

- 1) Desarrollar una herramienta computacional para determinar la eficiencia energética de los motores eléctricos,
- 2) Identificar qué motores no cumplen con la categoría de eficiencia energética IE3,
- 3) Evaluar el ahorro que supondría reemplazar los motores ineficientes por motores IE3,
- 4) Evaluar el costo que supondría adquirir motores eléctricos de la categoría IE3,
- 5) Realizar el análisis costo-beneficio del reemplazo de motores ineficientes por motores de categoría IE3.

Para establecer una meta de eficiencia energética para los motores eléctricos se asume que Francia como parte de la Unión Europea ha adoptado la categoría de eficiencia IE3 “Eficiencia Premium” para todos sus motores eléctricos.

Este proyecto se basa en el área de investigación de modelos matemáticos de estimación in situ de la eficiencia energética de motores eléctricos, que es aplicable sin necesidad desmontar los motores eléctricos y en base de parámetros eléctricos de sencilla adquisición. En particular en este proyecto se desarrolla una herramienta computacional para determinar la eficiencia energética de motores eléctricos, empleando para ello algunas mediciones de

parámetros de las máquinas eléctricas, el circuito equivalente del motor eléctrico y técnicas de optimización heurística.

Como se indica y se amplía más adelante en la sección 3.6.2, la metodología de desarrollo del proyecto seleccionada será de Cascada.

A continuación, se presentan los pasos de la metodología para la determinación de la eficiencia energética de los motores eléctricos:

1. Recopilar los datos de placa del motor: fabricante, potencia (kW), tensión (V), corriente (A), factor de potencia, eficiencia, velocidad nominal (rpm), clase de aislamiento, conexión, diseño del motor, y otros datos que puedan resultar de interés.
2. Medir la resistencia en el estator y su temperatura la cual fue medida según la norma IEEE Std 118-1978 ("IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement," 1978).
3. Colocar el analizador de redes en la caja de conexiones o en el Centro de Control de Motores (CCM) y medir la velocidad en el eje del motor. Los registros se realizarán con una frecuencia que dependerá del régimen de la carga.
4. Preparar la información en una hoja Excel con el formato de la Tabla 9. Cada vector columna representa los valores registrados en las diferentes mediciones para las variables que se especifican en la primera fila.

Tabla 9 Formato de recopilación de datos para aplicar programa de determinación de la eficiencia

| Est | Vab | Vbc | Vca | Ia | Ib | Ic | rpm | Pt |
|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|
| | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Est: Estado de Carga (%)
- Vab, Vbc, Vca: Tensiones de línea entre cada fase (V)
- Ia, Ib, Ic: Corrientes de línea para cada fase (A)
- Pt: Potencia eléctrica de entrada (W)
- rpm: Velocidad del eje del motor (rpm)

5. Aplicar el procedimiento de optimización basado en el algoritmo genético presentado en el apartado 3.3.1 para la determinación de la eficiencia de motores eléctricos de inducción en condiciones de campo.

3.3.1 Procedimiento de optimización

En la Figura 7 se muestra un esquema básico de la herramienta computacional a ser desarrollada en el que se pueden observar los datos de entrada y datos de salida del modelo. El bloque denominado “Algoritmo Genético” se implementa para resolver los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción que se muestra en la Figura 4. Posteriormente, en el bloque denominado “Cálculo de parámetros de salida” se calculan los parámetros Potencia de salida, Eficiencia y Pérdidas. Esta herramienta computacional será implementada en Matlab debido a que este software dispone de un módulo de optimización basado en algoritmos genéticos (Mathworks, 2021), además de proveer un lenguaje sencillo de programación.

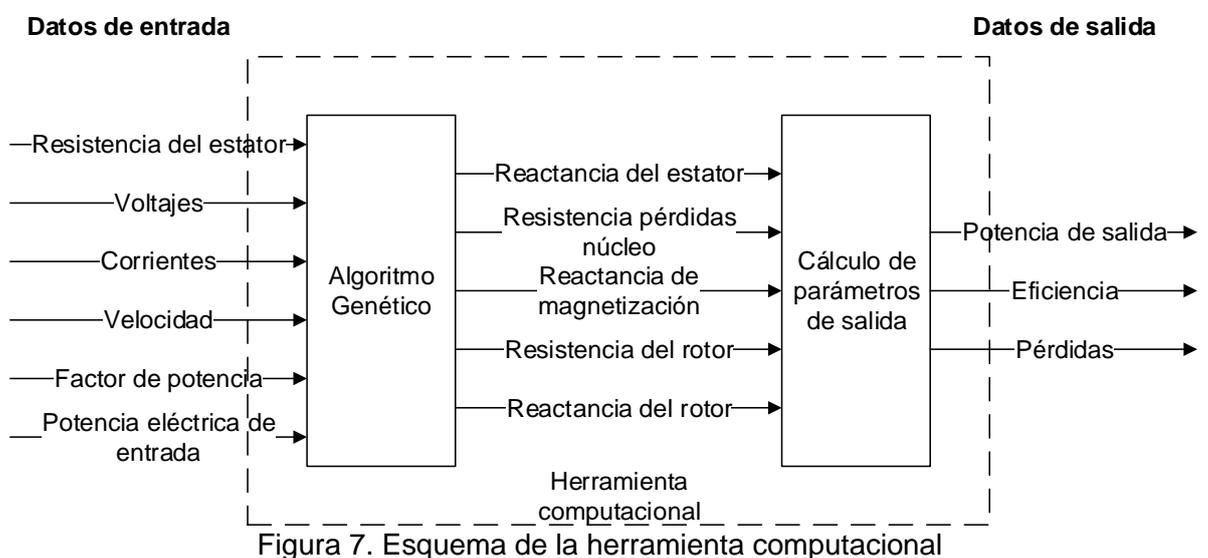


Figura 7. Esquema de la herramienta computacional

Fuente: Elaboración propia

Cabe indicar que un algoritmo genético es una heurística de búsqueda inspirada en la teoría de la evolución natural de Charles Darwin. Este algoritmo refleja el proceso de selección natural en el que se seleccionan los individuos más aptos para la reproducción con el fin de producir descendencia de la próxima generación. El proceso de selección natural comienza con la selección de los individuos más aptos de una población. Se producen descendientes que heredan las características de los padres y se agregarán a la próxima generación. Si los padres tienen una mejor condición física, sus hijos serán mejores que los padres y tendrán más posibilidades de sobrevivir. Este proceso sigue iterando y al final, se encontrará una generación con los individuos más aptos. Esta noción se puede aplicar a un problema de búsqueda en optimización. Se consideran un conjunto de soluciones para un problema y se selecciona el conjunto de las mejores de entre ellas (Mallawaarachchi, 2017).

En cumplimiento de lo solicitado en la convocatoria, se indica que para la ejecución de este proyecto se ha previsto la participación de al menos un 40% de personal femenino.

3.4 Impactos

En cuanto a los impactos de este proyecto, se sostiene que por una parte contribuirá positivamente a la economía de la industria automotriz Renault. Como se presenta en la sección 2.2.4, a través de la implementación del proyecto, se ha detectado que de 300 motores eléctricos de la industria, 188 no cumplen con la categoría de eficiencia IE3. De estos 188 motores eléctricos, como resultado de los análisis realizados sería rentable reemplazar 165 motores eléctricos, obteniéndose por concepto del reemplazo de estos motores un beneficio neto de 4.194.787 €.

Con este proyecto se obtiene un impacto ecológico. El ahorro de 5,94 GWh anuales de energía eléctrica implica que una parte de las centrales de generación térmica de Francia reduzcan su producción, evitando la emisión de gases de efecto invernadero. Este impacto es positivo para toda la sociedad.

En el aspecto técnico un impacto que tiene este proyecto es que, a través de la reducción de la demanda de la industria, se reduce la carga eléctrica sobre los conductores eléctricos. Esto provoca una reducción de pérdidas por conducción proporcional al cuadrado de la corriente, bajo la ley física de I^2R , donde I es la corriente y R es la resistencia de los conductores.

Los impactos previstos por el reemplazo de motores eléctricos ineficientes, se ve limitado por la decisión de la Unión Europea (y Francia) de adoptar la categoría de eficiencia IE3 “Eficiencia Premium”. Si se adoptase la categoría de eficiencia IE4 “Eficiencia Super Premium” los ahorros obtenidos por el reemplazo de motores eficientes serían mucho mayores a los obtenidos en el apartado 2.2.4.

3.5 Medidas para maximizar el impacto

3.5.1 Difusión y explotación de resultados

Con la finalidad de cumplir con la difusión de los resultados obtenidos de este proyecto, se ha planificado diseñar una página web en la que se irán publicando los avances del proyecto. Esta página web contendrá la siguiente información:

- Motivación, alcance y objetivos del proyecto.
- Vídeos que expliquen el proyecto y que proyecten las actividades de medición de eficiencia realizadas por los técnicos.

- Entrevistas con los técnicos del proyecto por parte de SGS, responsables de realizar las mediciones de eficiencia energética.
- Impactos técnicos, económicos y sociales esperados del proyecto.

Para la difusión de los resultados se prevé además la creación de contenido visual, que estará bajo el liderazgo de la directora de comunicación y de una creadora de contenido visual. El contenido visual proyectará entrevistas con los socios claves del consorcio y documentará todo el proceso del proyecto, desde su inicio hasta su fin.

También se prevé difundir el proyecto a través de un artículo técnico a ser elaborado por la firma consultora SGS con la colaboración de la industria automotriz Renault y de la industria fabricante de motores Siemens. Este artículo tendrá como característica ser de acceso abierto para todo el público, y abarcará los aspectos técnicos, económicos y sociales del proyecto.

La idea detrás de la difusión del proyecto aparte de comunicar los resultados del mismo, será motivar e incentivar a otras industrias europeas a implementar proyectos de eficiencia energética dadas sus ventajas y beneficios.

Por otra parte, en cuanto a la explotación de los resultados del proyecto, la firma SGS confiere a Renault el derecho de la utilización y explotación de su propiedad intelectual, esto es la utilización de la herramienta computacional desarrollada para la estimación de la eficiencia energética de sus motores eléctricos.

Las acciones de difusión estarán dirigidas al sector académico, industrial y comercial. Para el sector académico e industrial se prevé la elaboración de artículos técnicos y participación en congresos académicos e industriales, en los que presente didácticamente el proceso de implementación de la herramienta computacional para determinar la eficiencia energética y los resultados alcanzados con el proyecto de eficiencia energética. La efectividad de la actividad de difusión a través de artículos técnicos se medirá a través del número de citas realizadas por terceros.

Las acciones de difusión para el sector comercial se darán a través de contenido visual promocional cargado a YouTube. En este sentido, la efectividad de esta acción de difusión se medirá a través del número de vistas de los videos promocionales cargados a la plataforma.

3.5.2 Actividades de comunicación

El equipo de comunicación de Renault desarrollará un plan de comunicación para poner al tanto de la comunidad las motivaciones del proyecto y los resultados obtenidos durante el periodo de la subvención.

La campaña de comunicación del proyecto se desarrollará por una parte creando contenido visual en el canal oficial de YouTube del Grupo Renault, que será difundido mediante publicidad pagada en las redes sociales Facebook, Twitter e Instagram que son los medios de comunicación más seguidos por la población europea y en particular por la población francesa.

Esta campaña de comunicación tendrá una componente de concientización. Para cumplir con ello, se procurará que los vídeos a ser desarrollados sean muy educativos empezando desde el concepto básico de la eficiencia energética. Luego se indicará el alcance del proyecto que consiste en el análisis de la eficiencia energética de los 300 motores eléctricos que pertenecen a Renault. Se indicará además el ahorro energético previsto por efectos del reemplazo de motores ineficientes por motores de categoría de eficiencia IE3, que asciende a 6,23 GWh de energía a lo largo de la vida útil de los motores. Será muy importante destacar que esta reducción de consumo de energía eléctrica tiene beneficios ecológicos, ya que ayuda a reducir la producción de energía de centrales de generación térmica, y en consecuencia reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

Las actividades de comunicación también se llevarán al ámbito académico a través de la participación en conferencias técnicas con lugar en Europa y elaboración de un artículo técnico a ser publicado en una revista indexada y de libre acceso, esto último como lo establece la convocatoria.

3.6 Implementación

En este capítulo de trabajo se presentarán todos los paquetes de trabajo, señalando las diferentes tareas y entregables para cada uno de ellos. Además, se presentará de forma gráfica el cronograma del proyecto mediante un diagrama de Gantt. Finalmente, se presentará el consorcio en su conjunto y de los recursos necesarios para la ejecución del proyecto.

3.6.1 Plan de trabajo – Paquetes de trabajo y entregables

En este apartado, se han empleado las siguientes siglas:

WP: Paquete de trabajo

T: Tarea

D: Entregable

P: Participantes en paquete de trabajo

L: Líder de tarea

M: Hito

El presente proyecto tiene una duración de 6 meses, el cual se ha dividido en diferentes paquetes de trabajo (WP). El primer WP consiste en la Gestión y Coordinación del Proyecto. El segundo WP consiste en la Comunicación y Divulgación del proyecto. Los cuatro WP restantes tienen que ver con el trabajo técnico-científico del proyecto.

1) Gestión del proyecto. Este WP tiene como objetivos gestionar las acciones de planificación, organización, seguimiento y control, coordinación y cierre del proyecto. Además, en este WP se tratarán temas contractuales, administrativos, legales y financieros del proyecto. Este WP tendrá lugar durante toda la duración del proyecto y estará liderado por Renault.

2) Comunicación y divulgación del proyecto. Este WP tiene como objetivo comunicar a todos los miembros del proyecto sobre las actividades del proyecto e hitos alcanzados, además de la divulgación del proyecto dentro del sector industrial y académico europeo. Este WP tendrá lugar durante toda la duración del proyecto y estará liderado por Renault.

3) Desarrollo de herramienta computacional para la determinación de la eficiencia de motores. Este WP tiene como objetivo el desarrollo y la implementación de una herramienta computacional basada en algoritmos genéticos que tendrá por finalidad determinar la eficiencia energética de los motores eléctricos, usando datos medidos de los motores eléctricos y el circuito equivalente del motor eléctrico de inducción. Dentro de este WP también se contemplará la realización de pruebas técnicas a la herramienta computacional. Este WP estará liderado por SGS.

4) Adquisición de instrumentación y equipos para realizar toma de datos. Este WP tendrá por objetivo elaborar el listado de instrumentos y equipos de medición para la estimación de la eficiencia energética de los motores eléctricos, así como cumplir con su adquisición. Este WP tendrá una duración de un mes y estará liderado por Renault.

5) Realización de toma de datos en motores eléctricos de inducción. En este WP se elaborarán los protocolos y hojas de toma de datos de los motores eléctricos. También se realizará la adquisición de datos de los motores eléctricos y se aplicará la metodología de estimación de su eficiencia energética. Este WP tendrá una duración de un poco más de tres meses y estará liderado por SGS.

6) Asesoramiento por parte de expertos en motores eléctricos. En este WP se recibirá por parte de Siemens, asesoramiento técnico acerca del precio, características y clase de eficiencia de sus motores, para la realización de los análisis costo-beneficio del reemplazo de motores eléctricos ineficientes, por motores de clase de eficiencia IE3. Este WP tendrá una duración de un mes y estará liderado por Siemens.

A continuación, se presentan las descripciones de los diferentes paquetes de trabajo:

Tabla 10. Descripción correspondiente al WP 1

| | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|--------------|---|----------------------------|-------|----------------|--|
| Número de paquete trabajo | WP1 | Líder | | | | Renault | |
| Título del paquete de trabajo | Gestión del Proyecto | | | | | | |
| Número de participantes | 4 | 1 | 1 | | | | |
| Nombre corto del participante | R | SGS | S | | | | |
| Persona mes por participante | 1 | 1 | 1 | | | | |
| Mes de inicio | Enero | | | Mes de Finalización | Junio | | |

Objetivos

Gestionar las acciones de planificación, organización, seguimiento y control, coordinación y cierre del proyecto.

Descripción del trabajo

T1.1. Gestión de temas contractuales, administrativos, legales y financieros. **Líder: Renault**
Elaboración de la documentación necesaria para arrancar el proyecto.

T1.2. Definición del consorcio. **Líder: Renault; Participante: SGS; Participante: Siemens**
Firma de acuerdo para el establecimiento de derechos y obligaciones de cada uno de los participantes.

T1.3. Gestión de recopilación y envío de documentación requerida por la Comisión Europea. **Líder: Renault.**
Gestionar todo tipo de documentación para la Comisión Europea.

Entregables

D1.1. Acuerdo de consorcio.
D1.2. Informe de creación de consorcio.
D1.3. Informe de cierre del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Descripción correspondiente al WP 2

| | | | | | |
|--------------------------------------|---|--------------|---|----------------------------|---------|
| Número de paquete trabajo | WP2 | Líder | | | Renault |
| Título del paquete de trabajo | Comunicación y divulgación del proyecto | | | | |
| Número de participantes | 6 | 1 | 1 | | |
| Nombre corto del participante | R | SGS | S | | |
| Persona mes por participante | 1 | 1 | 1 | | |
| Mes de inicio | Enero | | | Mes de Finalización | Junio |

Objetivos

Comunicación a todos los miembros del proyecto sobre las actividades del proyecto y de los hitos alcanzados.
Divulgación de los avances del proyecto dentro del sector industrial y académico.

Descripción del trabajo

T2.1. Creación de página web del proyecto. **Líder: Renault**

Diseño de página web que contenga información de motivación, alcance y objetivos del proyecto, y además que disponga de contenido visual que explique el proyecto y que proyecte las actividades de medición de eficiencia realizadas por los técnicos.

T2.2. Creación de contenido visual en el canal oficial de YouTube del Grupo Renault. **Líder: Renault**

Creación de contenido visual educativo y de difusión del proyecto de eficiencia energética.

T2.3. Preparación de evento de arranque del proyecto con la participación de la prensa. **Líder: Renault**

Preparación de conferencia de prensa para dar arranque al proyecto.

T2.4. Difusión cada hito importante del proyecto ante la prensa. **Líder: Renault**

Elaboración y envío de nota de prensa ante la culminación de cada hito importante del proyecto.

T2.5. Difusión de la finalización del proyecto y de resultados alcanzados. **Líder: Renault**

Elaboración y envío de nota de prensa ante la finalización del proyecto, comunicando los resultados obtenidos.

T2.6. Elaboración de artículo técnico a ser presentado en revista indexada de acceso abierto.

Líder: Renault, **Participante:** SGS, **Participante:** Siemens

Difusión del proyecto y sus resultados en un artículo técnico a ser publicado en revista indexada de acceso abierto.

Entregables

D2.1. Página web del proyecto

D2.2. Vídeos con contenido visual del proyecto en plataforma YouTube

D2.3. Artículo técnico

D2.4. Notas de prensa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Descripción correspondiente al WP 3

| | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|--------------|--|----------------------------|---------|------------|--|
| Número de paquete trabajo | WP3 | Líder | | | | SGS | |
| Título del paquete de trabajo | Desarrollo de herramienta computacional para la determinación de la eficiencia de motores | | | | | | |
| Número de participantes | 1 | | | | | | |
| Nombre corto del participante | SGS | | | | | | |
| Persona mes por participante | 1 | | | | | | |
| Mes de inicio | Enero | | | Mes de Finalización | Febrero | | |

Objetivos

Desarrollar una herramienta computacional en Matlab para determinar la eficiencia energética de los motores en función a datos de mediciones de parámetros eléctricos.
Realizar pruebas técnicas para evaluar la eficacia de la herramienta computacional.

Descripción del trabajo

T3.1. Implementación de código de programación en lenguaje de Matlab. **Líder: SGS**
Escritura de programa computacional para determinar la eficiencia de motores eléctricos.
T3.2. Realización de pruebas técnicas a la herramienta computacional. **Líder: SGS**
Se realizarán pruebas para determinar la eficacia de la herramienta computacional.

Entregables

D3.1. Herramienta computacional para la determinación de la eficiencia energética de motores eléctricos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Descripción correspondiente al WP 4

| | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|--------------|--|----------------------------|---------|---------|--|
| Número de paquete trabajo | WP4 | Líder | | | | Renault | |
| Título del paquete de trabajo | Adquisición de instrumentación y equipos para realizar toma de datos | | | | | | |
| Número de participantes | 4 | 1 | | | | | |
| Nombre corto del participante | R | SGS | | | | | |
| Persona mes por participante | 1 | 1 | | | | | |
| Mes de inicio | Febrero | | | Mes de Finalización | Febrero | | |

Objetivos

Analizar la instrumentación y equipos de medición a adquirirse para realizar la toma de datos para la estimación de la eficiencia energética de los motores eléctricos.

Definir especificaciones técnicas de equipos de medición a adquirirse.

Descripción del trabajo

T4.1. Disponer del listado de equipos a adquirir y sus presupuestos. **Líder: Renault, Participante: SGS**

Analizar las especificaciones de los equipos de medición requeridos para la estimación de la eficiencia energética de motores eléctricos y determinar su presupuesto referencial.

T4.2. Solicitar cotizaciones de equipos a diferentes proveedores. **Líder: Renault**

Buscar proveedores de equipos de medición que otorguen seguridad y garantía.

T4.3. Analizar las cotizaciones y decidir qué proveedores son los más apropiados. **Líder: Renault**

Aceptar cotizaciones que cumplan las especificaciones solicitadas en las mejores condiciones económicas.

T4.4. Realizar la adquisición de equipos. **Líder: Renault**

Realizar la transferencia de compra-venta por los equipos de medición.

Entregables

D4.1. Listado de equipos de medición a adquirir, presupuesto referencial y especificaciones.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Descripción correspondiente al WP 5

| | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|--------------|---|----------------------------|------------|--|--|
| Número de paquete trabajo | WP5 | Líder | | | SGS | | |
| Título del paquete de trabajo | Realización de toma de datos en motores eléctricos | | | | | | |
| Número de participantes | 2 | 4 | 1 | | | | |
| Nombre corto del participante | R | SGS | S | | | | |
| Persona mes por participante | 1 | 1 | 1 | | | | |
| Mes de inicio | Marzo | | | Mes de Finalización | Junio | | |

Objetivos

Elaborar protocolos de adquisición de datos.
 Realizar la adquisición de datos de los motores eléctricos de acuerdo con los protocolos elaborados.
 Estimar la eficiencia energética de los motores eléctricos.

Descripción del trabajo

T5.1. Elaborar hojas de tomas de datos en Excel. **Líder: SGS, Participante: Renault**
 Establecer un formato específico para facilitar la toma de datos de motores eléctricos.
 T5.2. Elaborar un protocolo para la realización adecuada de toma de datos. **Líder: SGS, Participante: Renault**
 El protocolo especificará las condiciones seguras para la toma datos.
 T5.3. Conectar los equipos de medición siguiendo el protocolo elaborado. **Líder: SGS, Participante: Renault**
 Los equipos de medición serán conectados conforme el protocolo elaborado.
 T5.4. Realizar la adquisición de datos de los motores eléctricos. **Líder: SGS, Participante: Renault**
 La adquisición de datos de los motores eléctricos se realizará conforme la metodología establecida.
 T5.5. Emplear metodología in situ para determinar la eficiencia de los motores eléctricos. **Líder: SGS, Participante: Renault, Participante: Siemens**

Entregables

D5.1. Hojas de toma de datos
 D5.2. Protocolo para la realización segura de toma de datos.
 D5.3. Informe de resultados de eficiencia energética de motores eléctricos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Descripción correspondiente al WP 6

| | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|--------------|---|----------------------------|-------|---------|--|
| Número de paquete trabajo | WP6 | Líder | | | | Siemens | |
| Título del paquete de trabajo | Asesoramiento por parte de expertos en motores eléctricos | | | | | | |
| Número de participantes | 1 | 1 | 4 | | | | |
| Nombre corto del participante | R | SGS | S | | | | |
| Persona mes por participante | 1 | 1 | 1 | | | | |
| Mes de inicio | Junio | | | Mes de Finalización | Junio | | |

Objetivos

Asesorar al consorcio en cuanto a las mejores características técnicas y económicas de los motores eléctricos, para tomar decisiones informadas sobre el reemplazo de motores ineficientes.

Descripción del trabajo

T6.1. Recomendar tipos de motores nuevos que reemplazarían a los de baja eficiencia. **Líder: Siemens, Participante: Renault, Participante: SGS**

De la gama de motores eléctricos que ofrece Siemens asesorar en el escogimiento de motores que reemplazarían a los motores ineficientes, en función a su categoría de eficiencia, potencia y precio.

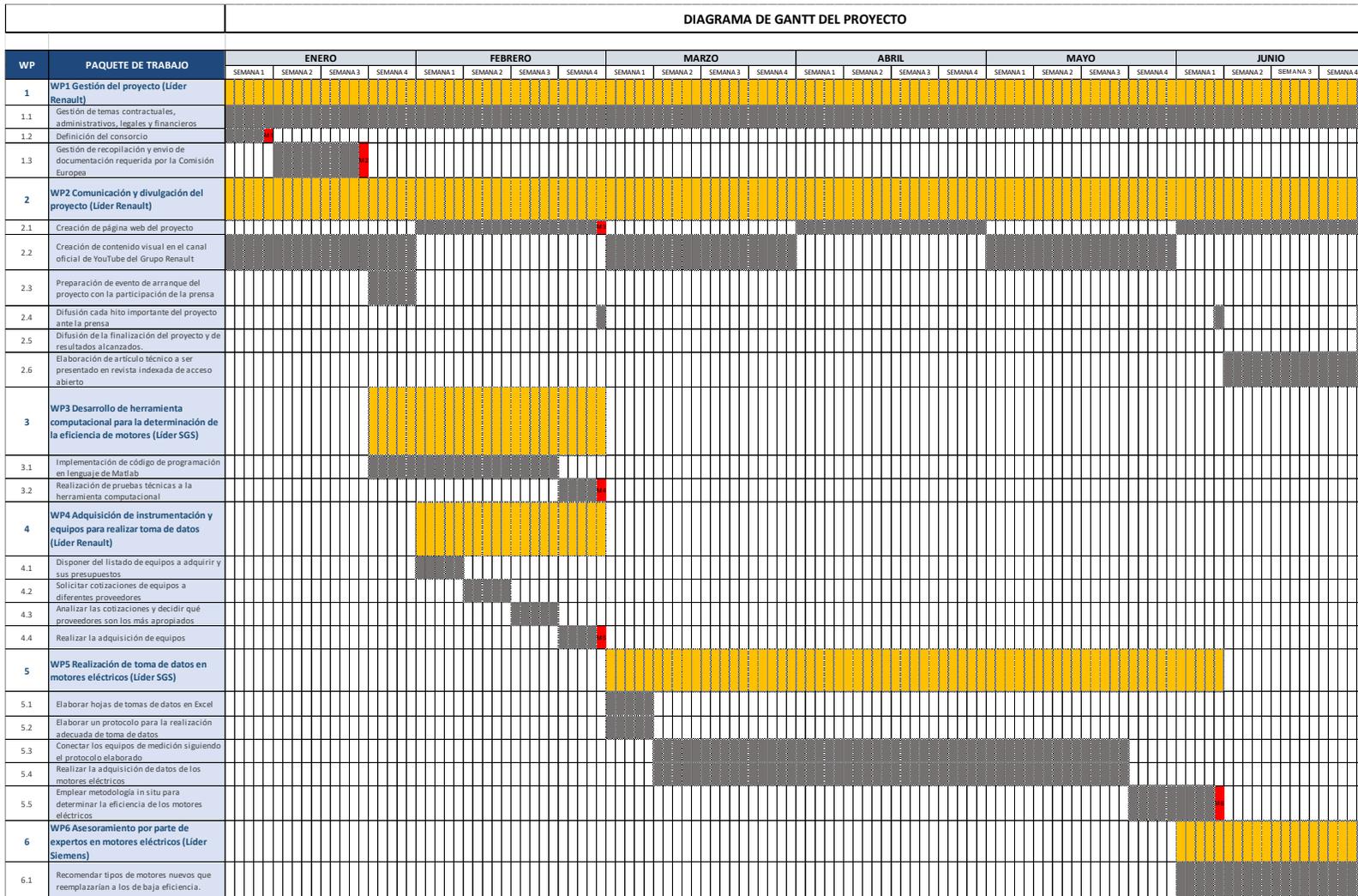
Entregables

D6.1. Informe de recomendación de reemplazo de motores eléctricos.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 16, se muestra un cronograma en donde se presenta el desglose de tareas de los paquetes de trabajo, así como su duración, dependencias e hitos.

Tabla 16. Diagrama de Gantt del proyecto



Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 17, se muestra la tabla resumen de los paquetes de trabajo, con sus líderes, fechas de inicio y fin de cada uno de ellos.

Tabla 17. Lista de paquetes de trabajo

| No. WP | Título de paquete de trabajo | No. Líder | Nombre corto del Líder | Persona-Mes | Mes de inicio | Mes de finalización |
|--------|---|-----------|------------------------|-------------|---------------|---------------------|
| WP1 | Gestión del proyecto | 1 | R | 6 | Enero | Junio |
| WP2 | Comunicación y divulgación del proyecto | 1 | R | 8 | Enero | Junio |
| WP3 | Desarrollo de herramienta computacional para la determinación de la eficiencia de motores | 2 | SGS | 1,25 | Enero | Febrero |
| WP4 | Adquisición de instrumentación y equipos para realizar toma de datos | 1 | R | 5 | Febrero | Febrero |
| WP5 | Realización de toma de datos en motores eléctricos | 2 | SGS | 7 | Marzo | Junio |
| WP6 | Asesoramiento por parte de expertos en motores eléctricos | 3 | S | 6 | Junio | Junio |

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 18 se muestra la lista de los entregables del proyecto de cada uno de los paquetes de trabajo. En esta tabla se ha utilizado la siguiente nomenclatura. Tipo, R: Documento, reporte, DEC: Sitios web, patente, estudios de mercado, acciones prensa & medios, vídeos, etc., OTRO: Software, diagrama técnico, etc. Nivel de diseminación, PU: Público, completamente abierto, e.g. web, CO: Confidencial, CI: Clasificado. Fecha de entrega: Se mide en meses desde la fecha de inicio del proyecto.

Tabla 18. Listado de entregables

| No. | Título del entregable | No. WP | Nombre corto del Líder | Tipo | Nivel de diseminación | Fecha de entrega |
|-------|--|--------|------------------------|------|-----------------------|------------------|
| D1.1. | Acuerdo de consorcio | WP1 | R | R | CO | 1 |
| D1.2. | Informe de creación de consorcio | WP1 | R | R | PU | 1 |
| D1.3. | Informe de cierre del proyecto | WP1 | R | R | PU | 6 |
| D2.1. | Página web del proyecto | WP2 | R | DEC | PU | 2 |
| D2.2. | Vídeos con contenido visual del proyecto en plataforma YouTube | WP2 | R | DEC | PU | 1 |
| D2.3. | Artículo técnico | WP2 | R | R | PU | 6 |
| D2.4. | Notas de prensa | WP2 | R | DEC | PU | 1 |
| D3.1. | Herramienta computacional para la determinación de la eficiencia energética de motores eléctricos. | WP3 | SGS | OTRO | CO | 2 |
| D4.1. | Listado de equipos de medición a adquirir, presupuesto referencial y especificaciones. | WP4 | R | R | PU | 2 |
| D5.1. | Hojas de toma de datos | WP5 | SGS | R | PU | 3 |
| D5.2. | Protocolo para la realización segura de toma de datos | WP5 | SGS | R | PU | 3 |
| D5.3. | Informe de resultados de eficiencia energética de motores eléctricos | WP5 | SGS | R | PU | 6 |
| D6.1. | Informe de recomendación de reemplazo de motores eléctricos | WP6 | S | R | PU | 6 |

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una tabla con todos los hitos del diagrama de Gantt y el medio de verificación correspondiente.

Tabla 19. Listado de hitos

| Número de hito | Nombre de Hito | Paquete de trabajo relacionado | Fecha de entrega (días) | Medio de verificación |
|----------------|---|--------------------------------|-------------------------|---|
| M1 | Definición del consorcio | WP 1 | 5 | Firma de los socios del consorcio de la minuta de conformación del consorcio. |
| M2 | Gestión de recopilación y envío de documentación requerida por la Comisión Europea | WP 1 | 15 | Impresión de comprobante de recepción de postulación a la convocatoria. |
| M3 | Creación de página web del proyecto | WP 2 | 40 | Acceso al sitio web del proyecto y verificación de dominio correcto. |
| M4 | Implementación de herramienta computacional | WP 3 | 40 | Cumplimiento de pruebas técnicas. |
| M5 | Realizar adquisición de equipos | WP 4 | 40 | Comprobación de ingreso de equipos al inventario de activos de Renault |
| M6 | Emplear metodología in situ para determinar la eficiencia de los motores eléctricos | WP5 | 105 | Constatación de la elaboración del informe de determinación de eficiencia de motores eléctricos |

Nota: M: Milestone o hito
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8 se presenta el diagrama PERT, donde se muestra una representación gráfica de los componentes del proyecto y como se inter-relacionan.

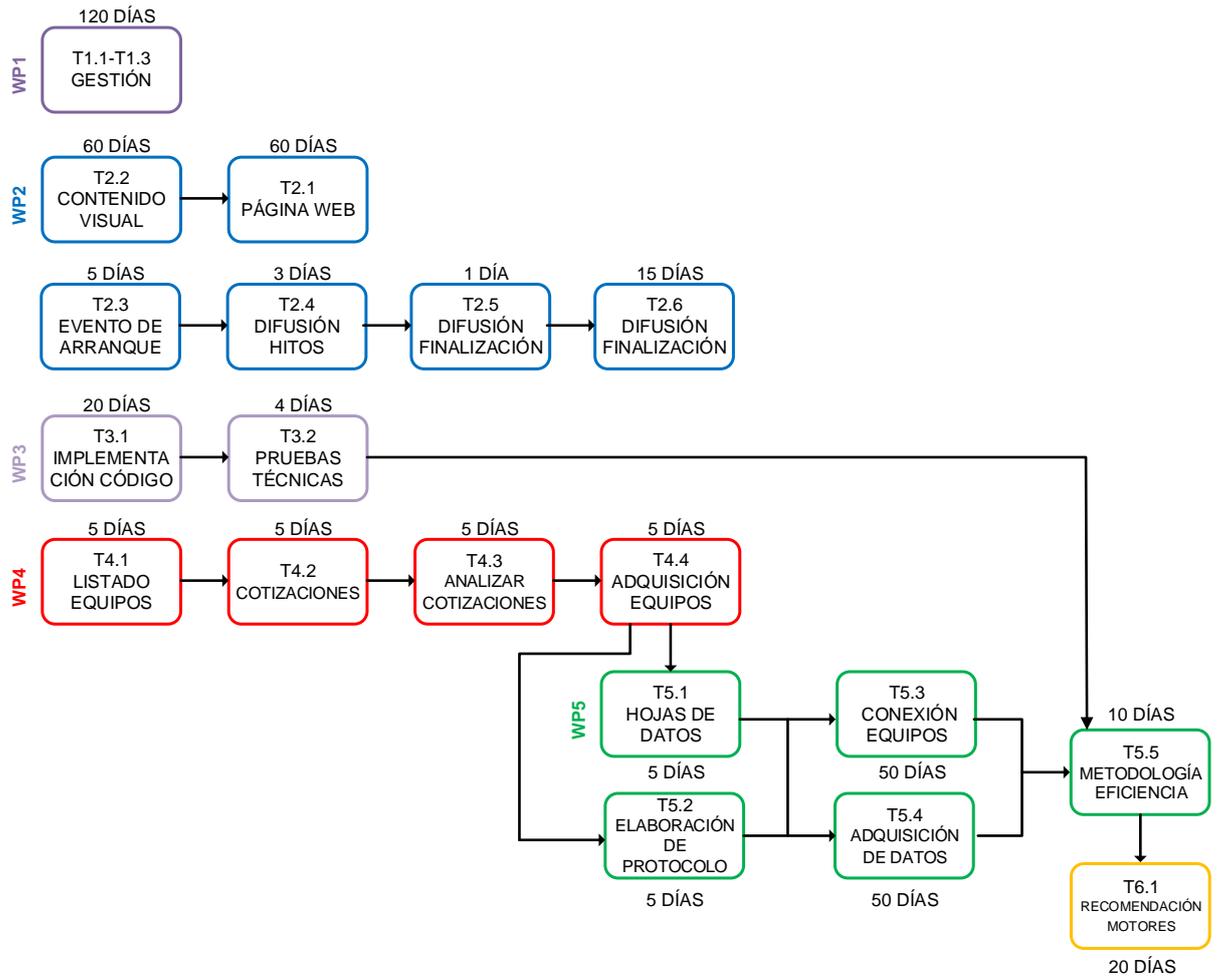


Figura 8. Diagrama PERT

Nota: **WP1:** Gestión del proyecto, **WP2:** Comunicación y divulgación del proyecto, **WP3:** Desarrollo de herramienta computacional para la determinación de la eficiencia de motores, **WP4:** Adquisición de instrumentación y equipos para realizar toma de datos, **WP5:** Realización de toma de datos en motores eléctricos, **WP6:** Asesoramiento por parte de expertos en motores eléctricos.

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Estructura de gestión y procedimientos

La metodología de gestión a emplearse en este proyecto será la metodología de Cascada (Waterfall) presentada en la Figura 9. Este es un proceso de desarrollo secuencial o ligeramente solapado que suele utilizarse en gestión de proyectos. En el proceso de inicio se definen generalidades del proyecto, se realizan varias reuniones de trabajo para definir las características y contenido del proyecto. En el proceso de planificación se desarrollan los diferentes planes de gestión y se diseña el proyecto. En el proceso de ejecución se realizan las tareas planificadas con el fin de obtener los entregables. El proceso de monitorización y control se ejecuta en paralelo al proceso de ejecución. En este proceso se supervisan las tareas ejecutadas y se comparan con la planificación, además se aplican medidas de corrección al detectarse desviaciones. El proceso de cierre ocurre al finalizarse la ejecución del proyecto. El cierre del proyecto ocurre en tres situaciones: Cuando se cumple con la entrega de todas las tareas planificadas, cuando no es posible ejecutar parte o todas las tareas ejecutadas; o cuando el proyecto deja de ser viable o realizable (UNIR, 2021).



Figura 9. Metodología de gestión propuesta

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se mostrará la estructura de gestión del proyecto y los roles y responsabilidades de los socios del consorcio. En lo más alto de la estructura, se encuentra la *Project Manager*, que es la única persona que tiene comunicación directa con la Comisión Europea (CE). Por su parte, el Consejo de administración del proyecto, está formado por cada uno de los líderes de los paquetes de trabajo. Finalmente, cada paquete de trabajo tiene un líder responsable de la tarea y participantes para la realización de las sub-tareas. En la Figura 10, se muestra un diagrama de la estructura propuesta.

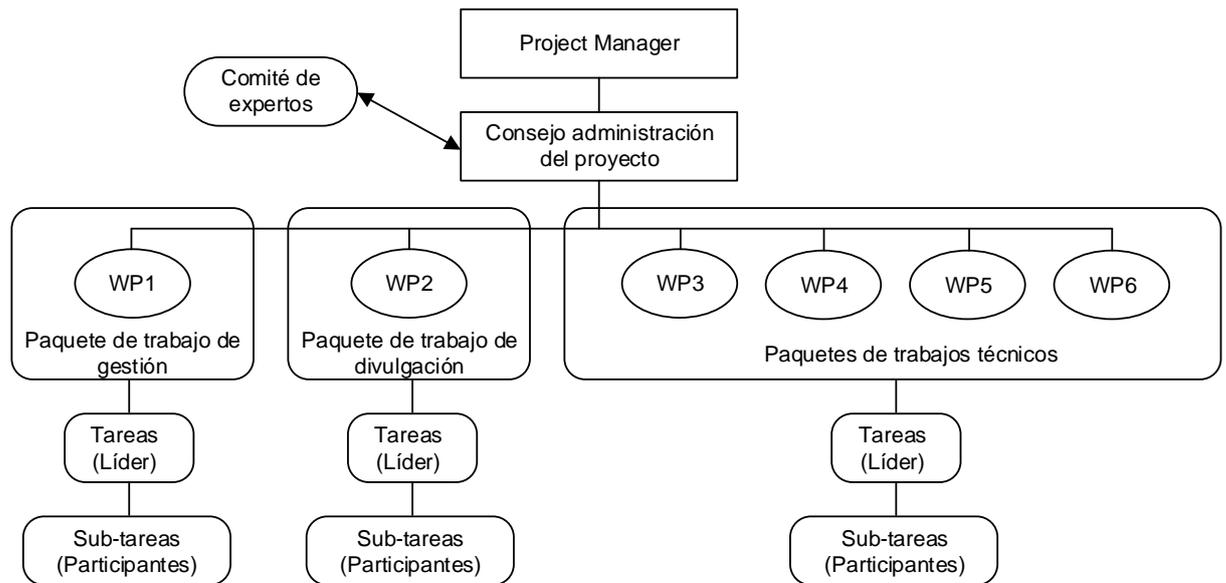


Figura 10. Estructura de gestión del proyecto

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la descripción de los roles:

Project Manager: Será el coordinador del proyecto. Tendrá como responsabilidad dar seguimiento al proyecto de manera que se cumpla en el tiempo y presupuesto fijado. Ejercerá la responsabilidad operativa del proyecto y cumplirá con las actividades de gestión del proyecto.

Consejo de administración del proyecto: Este consejo está conformado por un representante de cada socio. Es el cuerpo colegiado que toma las decisiones de última instancia y dirime conflictos. Validará que los recursos utilizados en el proyecto estén justificados y verificará el progreso de la ejecución del proyecto.

Comité de expertos: El comité de expertos estará conformado por miembros del socio Siemens, quienes tienen una amplia experticia en fabricación de motores eléctricos.

Líderes de los paquetes de trabajo: Gestionan todas las tareas del paquete de trabajo, asegurando el cumplimiento de los objetivos y resultados de las tareas.

Líderes de tareas: Trabajarán en las diferentes tareas. Ciertas tareas serán ejecutadas con la colaboración de otros socios.

Tabla 20. Matriz de responsabilidades

| | | | | |
|----|--------|---------|-----|---------|
| WP | SOCIOS | Renault | SGS | Siemens |
| | 1 | R | I | I |
| | 2 | R | C/I | C/I |
| | 3 | I | R | I |
| | 4 | R | S | S |
| | 5 | S | R | S |
| | 6 | S | S | R |

Nota: R: Responsable; S: Soporte; C: Consultor; I: Informado

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Plan de gestión de riesgos

A continuación, en la Tabla 21 se describen los riesgos críticos relacionados con la implementación del proyecto. Además, se detallan las medidas de mitigación de riesgos.

Tabla 21. Listado de riesgos identificados

| Descripción del riesgo | Paquete de trabajo involucrado | Medida de mitigación propuesta |
|--|--------------------------------|---|
| Excedencia en la ejecución del presupuesto del proyecto | WP 1 | Monitoreo de ejecución presupuestaria mediante el método de gestión del valor ganado. |
| Que el programa computacional Matlab no disponga del módulo de optimización de Algoritmo Genético y no esté operativo por falta de licenciamiento. | WP3 | Asegurarse que previo al inicio del proyecto, SGS disponga del licenciamiento del programa Matlab y que tenga disponible el módulo de Algoritmo Genético. |

| | | |
|--|------|--|
| Dadas las condiciones operativas para la adquisición de datos de los motores eléctricos, en las que se requiere que estos se encuentren encendidos, es necesario tomar precauciones para evitar riesgos de electrocución | WP 5 | Se deberán dictar talleres de riesgo en el trabajo al personal que realizará las pruebas. Asimismo, se deberán implementar brigadas de riesgo del trabajo en el que por cada brigada existirá un responsable de que se tomen todas las medidas de precaución para evitar riesgos de electrocución. |
| Que ocurran riesgos laborales por falta de uso o mal uso de implementos de trabajo | WP5 | Asegurarse de dotar al personal que realiza la toma de datos, de implementos de trabajo como gafas, trajes, guantes, botas, y cascos, para minimizar la ocurrencia de riesgos laborales. |
| Errores en la adquisición de datos por parte del personal | WP 5 | Elaborar un protocolo de pruebas que cuente con la aprobación de todos los miembros del consorcio, el mismo que debe ser socializado con el personal que realizará la toma de datos, para mitigar la obtención de datos erróneos. |
| Demoras en toma de datos | WP 5 | Supervisar los avances en el cronograma de trabajo, para cumplir con la adquisición de datos de los 300 motores, en tiempo y forma. Realizar un monitoreo de avance de actividades para identificar retrasos y poder realizar acciones correctivas. |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 22 se muestra la cuantificación del nivel de riesgos para cada amenaza detectada.

Tabla 22. Nivel de riesgo detectado

| Amenazas | Consecuencias | Mitigación | Probabilidad | Impacto | Prioridad |
|---|---|---|--------------|---------|-----------|
| 1) Excedencia en la ejecución del presupuesto del proyecto | Cierre del proyecto por falta de presupuesto | Monitoreo de ejecución presupuestaria mediante el método de gestión del valor ganado. | C | A | B |
| 2) Que el programa computacional Matlab no disponga del módulo de optimización de Algoritmo Genético y no esté operativo por falta de licenciamiento. | Incumplimiento de desarrollo de herramienta computacional para estimar la eficiencia energética de los motores eléctricos | Asegurarse que previo al inicio del proyecto, SGS disponga del licenciamiento del programa Matlab y que tenga disponible el módulo de Algoritmo Genético. | D | A | C |
| 3) Dadas las condiciones operativas para | Personal técnico herido por electrocución. | Se deberán dictar talleres de riesgo en el trabajo al | B | A | A |

| | | | | | |
|--|--|---|---|---|---|
| la adquisición de datos de los motores eléctricos, en las que se requiere que estos se encuentren encendidos, es necesario tomar precauciones para evitar riesgos de electrocución | Posibilidad de ocurrencia de cortocircuitos con la consecuencia de parada de procesos productivos de la planta industrial. | personal que realizará las pruebas. Asimismo, se deberán implementar brigadas de riesgo del trabajo en el que por cada brigada existirá un responsable de que se tomen todas las medidas de precaución para evitar riesgos de electrocución. | | | |
| 4) Que ocurran riesgos laborales por falta de uso o mal uso de implementos de trabajo | Personal herido de electrocución y quemaduras. | Asegurarse de dotar al personal que realiza la toma de datos, de implementos de trabajo como gafas, trajes, guantes, botas, y cascos, para minimizar la ocurrencia de riesgos laborales. | B | A | A |
| 5) Errores en la adquisición de datos por parte del personal | Resultados erróneos en la estimación de la eficiencia energética de motores eléctricos. | Elaborar un protocolo de pruebas que cuente con la aprobación de todos los miembros del consorcio, el mismo que debe ser socializado con el personal que realizará la toma de datos, para mitigar la obtención de datos erróneos. | C | C | C |
| 6) Demoras en toma de datos | Incumplimiento de cronograma de trabajo establecido | Supervisar los avances en el cronograma de trabajo, para cumplir con la adquisición de datos de los 300 motores, en tiempo y forma. Realizar un monitoreo de avance de actividades para identificar retrasos y poder realizar acciones correctivas. | B | E | C |

Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos, se ha identificado que los riesgos con mayor prioridad son los 3 y 4, que tienen relación con los riesgos de electrocución y quemaduras del personal técnico.

3.6.4 Consorcio como un conjunto

Tal como se indica en la convocatoria, en este apartado se presentará como funcionará el consorcio como conjunto y como se complementan entre sí.

En este proyecto los miembros del consorcio se complementan de la manera que se presenta a continuación. La industria automotriz Renault requiere mejorar los índices de eficiencia energética de sus motores eléctricos, sin embargo, no dispone del conocimiento técnico para desarrollar un estudio-trabajo de esta índole. Por este motivo, Renault ha decidido asociarse con la empresa SGS quien es especialista en estudios de evaluación de eficiencia energética en motores eléctricos, la cual ha desarrollado al menos 10 estudios de este tipo. Por otro lado, se ha decidido incorporar al consorcio a la empresa fabricante de motores eléctricos Siemens en calidad de asesora para la fase de selección de motores eficientes de reemplazo.

Cabe indicar que la tarea WP5, que consiste en la Realización de toma de datos en motores eléctricos, participarán conjuntamente y colaborativamente SGS y Siemens.

Es preciso indicar que todos los participantes del consorcio pertenecen a la Unión Europea.

3.6.5 Recursos a comprometer

El esfuerzo de todos los participantes que conforman el consorcio, se resume en la Tabla 23.

Tabla 23. Tabla resumen del esfuerzo por participante

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WP5 | WP6 | Total personas/mes por participante |
|---------------------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-------------------------------------|
| 1. Renault | 4 | 6 | - | 4 | 2 | 1 | 17 |
| 2. SGS | 1 | 1 | 1,25 | 1 | 4 | 1 | 9,25 |
| 3. Siemens | 1 | 1 | - | - | 1 | 4 | 7 |
| Total personas/mes | 6 | 8 | 1,25 | 5 | 7 | 6 | 33,25 |

Fuente: Elaboración propia

El coste total necesario para llevar a cabo el proyecto durante los 6 meses de duración, asciende a 269.996,88 €. A continuación, se presenta el desglose de cada uno de los importes calculados.

Costes directos de personal: Se han tomado en cuenta los costes/hora medio para cada uno de los participantes en función de su participación en cada una de las tareas (Tabla 24, Tabla 25, Tabla 26).

Otros costes directos: Se ha calculado los costes imputables a cada uno de los participantes por concepto de viajes, equipamiento y otros bienes y servicios (Tabla 27)

Para el cálculo total, se ha elaborado la Tabla 28 en la que se desglosa cada uno de los gastos previamente indicados.

En la Tabla 24 se muestran los costes directos de personal de Renault, para los diferentes paquetes de trabajo y para los diferentes profesionales que participan en ellos.

Tabla 24. Costes directos de personal de Renault

| PARTICIPANTE | Paquetes de trabajo | | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WP5 | WP6 | Total por participante |
|------------------|--|--------------------------|----------|----------|------|----------|----------|----------|------------------------|
| | Duración de las tareas (meses) | | 6 | 6 | 1,25 | 1 | 2 | 1 | |
| Renault | Project Manager | Sueldo medio mensual (€) | 1.950,00 | | | | | | 9.360,00 |
| | | % Desempeño | 80% | | | | | | |
| | | Coste total por WP (€) | 9.360,00 | | | | | | |
| | Asistente 1 del Project Manager | Sueldo medio mensual (€) | 1.200,00 | | | | | | 5.760,00 |
| | | % Desempeño | 80% | | | | | | |
| | | Coste total por WP (€) | 5.760,00 | | | | | | |
| | Diseñadora y creadora de página web | Sueldo medio mensual (€) | | 1.500,00 | | | | | 4.500,00 |
| | | % Desempeño | | 50% | | | | | |
| | | Coste total por WP (€) | | 4.500,00 | | | | | |
| | Creadora de contenido visual | Sueldo medio mensual (€) | | 1.500,00 | | | | | 4.500,00 |
| | | % Desempeño | | 50% | | | | | |
| | | Coste total por WP (€) | | 4.500,00 | | | | | |
| | Técnico eléctrico 1 - redactor de artículo técnico | Sueldo medio mensual (€) | | 1.300,00 | | 1.300,00 | 1.300,00 | 1.300,00 | 6.240,00 |
| | | % Desempeño | | 50% | | 90% | 30% | 30% | |
| | | Coste total por WP (€) | | 3.900,00 | | 1.170,00 | 780,00 | 390,00 | |
| | Técnico eléctrico 2 - redactor de artículo técnico | Sueldo medio mensual (€) | | 1.300,00 | | 1.300,00 | 1.300,00 | 1.300,00 | 6.240,00 |
| | | % Desempeño | | 50% | | 90% | 30% | 30% | |
| | | Coste total por WP (€) | | 3.900,00 | | 1.170,00 | 780,00 | 390,00 | |
| | Directora de comunicaciones | Sueldo medio mensual (€) | | 1.700,00 | | | | | 8.160,00 |
| | | % Desempeño | | 80% | | | | | |
| | | Coste total por WP (€) | | 8.160,00 | | | | | |
| 44.760,00 | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 25 se muestran los costes directos de personal de SGS, para los diferentes paquetes de trabajo y para los diferentes profesionales que participan en ellos.

Tabla 25. Costes directos de personal de SGS

| PARTICIPANTE | Paquetes de trabajo | | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WP5 | WP6 | Total por participante |
|--------------|--|--------------------------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
| | Duración de las tareas (meses) | | 6 | 6 | 1,25 | 1 | 2 | 1 | |
| SGS | Programadora | Sueldo medio mensual (€) | | | 1.500,00 | | | | 1.687,50 |
| | | % Desempeño | | | 90% | | | | |
| | | Coste total por WP (€) | | | 1.687,50 | | | | |
| | Técnico eléctrico 1 | Sueldo medio mensual (€) | | | | 1.300,00 | 1.300,00 | 1.300,00 | 3.900,00 |
| | | % Desempeño | | | | 75% | 75% | 75% | |
| | | Coste total por WP (€) | | | | 975,00 | 1.950,00 | 975,00 | |
| | Técnico eléctrico 2 | Sueldo medio mensual (€) | | | | | 1.300,00 | 1.300,00 | 2.925,00 |
| | | % Desempeño | | | | | 75% | 75% | |
| | | Coste total por WP (€) | | | | | 1.950,00 | 975,00 | |
| | Técnico eléctrico 3 - redactor de artículo técnico | Sueldo medio mensual (€) | | 1.300,00 | | | 1.300,00 | 1.300,00 | 8.775,00 |
| | | % Desempeño | | 75% | | | 75% | 75% | |
| | | Coste total por WP (€) | | 5.850,00 | | | 1.950,00 | 975,00 | |
| | | | | | | | | | 17.287,50 |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 26 se muestran los costes directos de personal de Siemens, para los diferentes paquetes de trabajo y para los diferentes profesionales que participan en ellos.

Tabla 26. Costes directos de personal de Siemens

| PARTICIPANTE | Paquetes de trabajo | | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WP5 | WP6 | Total por participante |
|-----------------|---|--------------------------|-----|----------|------|-----|----------|----------|------------------------|
| | Duración de las tareas (meses) | | 6 | 6 | 1,25 | 1 | 2 | 1 | |
| Siemens | Experta motores eléctricos 1 - redactora artículo técnico | Sueldo medio mensual (€) | | 1.600,00 | | | 1.600,00 | 1.600,00 | 7.200,00 |
| | | % Desempeño | | 50% | | | 50% | 50% | |
| | | Coste total por WP (€) | | 4.800,00 | | | 1.600,00 | 800,00 | |
| | Experto motores eléctricos 2 | Sueldo medio mensual (€) | | | | | 1.600,00 | 1.600,00 | 2.400,00 |
| | | % Desempeño | | | | | 50% | 50% | |
| | | Coste total por WP (€) | | | | | 1.600,00 | 800,00 | |
| 9.600,00 | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 27 se muestran los otros costes directos para los miembros del consorcio, en lo referente a los rubros de viajes, equipamiento y otros bienes y servicios.

Tabla 27. Otros costes directos de los miembros del consorcio

| | Rubro | Coste (€) | Justificación |
|-------------------|--------------------------|------------|---|
| | Viajes | | |
| 1. Renault | Equipamiento | 120.000,00 | Adquisición de: 1) Guantes de trabajo (300€), 2) Tacómetros (1.800€), 3) Analizadores de redes (86.900€), 4) Termómetros infrarrojos (1,300€), 5) Ohmímetros micrométricos (30.000€). |
| | Otros bienes y servicios | 850,00 | Tasa de publicación de artículo técnico de libre acceso (250€). Tasa de inscripción a congresos técnicos (2x300€=600€) |
| | Subtotal | 120.850,00 | |
| | | | |
| 2. SGS | Viajes | 10.500,00 | Reuniones con el consorcio en Francia, actividades en territorio (Vuelos, estancia, dietas). (10.500€) |
| | Equipamiento | | |
| | Otros bienes y servicios | 6.500,00 | Actualización de licencia para utilización del programa Matlab incluyendo módulo de algoritmos genéticos (6.500€) |
| | Subtotal | 17.000,00 | |
| 3. Siemens | Viajes | 6.500,00 | Reuniones con el consorcio en Francia, actividades en territorio (Vuelos, estancia, dietas). (6.500€) |
| | Equipamiento | | |
| | Otros bienes y servicios | | |
| | Subtotal | 6.500,00 | |
| TOTAL | | 144.350,00 | |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 28 se desglosa el presupuesto total del proyecto para cada miembro del consorcio, y por tipo de coste.

Tabla 28. Desglose presupuesto total

| No. | Socio | País | (A) Costes directos personal (€) | (B) Otros costes directos (€) | (C) Costes directos subcontr atación (€) | (D) Costes directos de proporciona r apoyo financiero a terceros (€) | (E) Costes de contribuciones en especie no utilizadas en instalaciones del beneficiario (€) | (F) Costes indirectos (€) (=0,25(A+B-E)) | (G) Costes unitarios especiales que cubren los costos directos e indirectos (€) | (H) Costes totales elegibles estimados (€) (=A + B + C + D + F + G) | (I) Tasa de reembols o | (J) Máx subvención (€) (=H*I) | (K) Subvención solicitada (€) |
|--------------|---------|----------|--|--|---|--|--|---|---|--|---------------------------------|--|-------------------------------------|
| 1 | Renault | Francia | 44.760,00 | 120.850,00 | - | - | - | 41.402,50 | - | 207.012,50 | 100% | 207.012,50 | 207.012,50 |
| 2 | SGS | España | 17.287,50 | 17.000,00 | - | - | - | 8.571,88 | - | 42.859,38 | 100% | 42.859,38 | 42.859,38 |
| 3 | Siemens | Alemania | 9.600,00 | 6.500,00 | - | - | - | 4.025,00 | - | 20.125,00 | 100% | 20.125,00 | 20.125,00 |
| Total | | | 71.647,50 | 144.350,00 | - | - | - | 53.999,38 | - | 269.996,88 | 100% | 269.996,88 | 269.996,88 |

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se muestra el desglose del presupuesto del proyecto distribuido por participante:

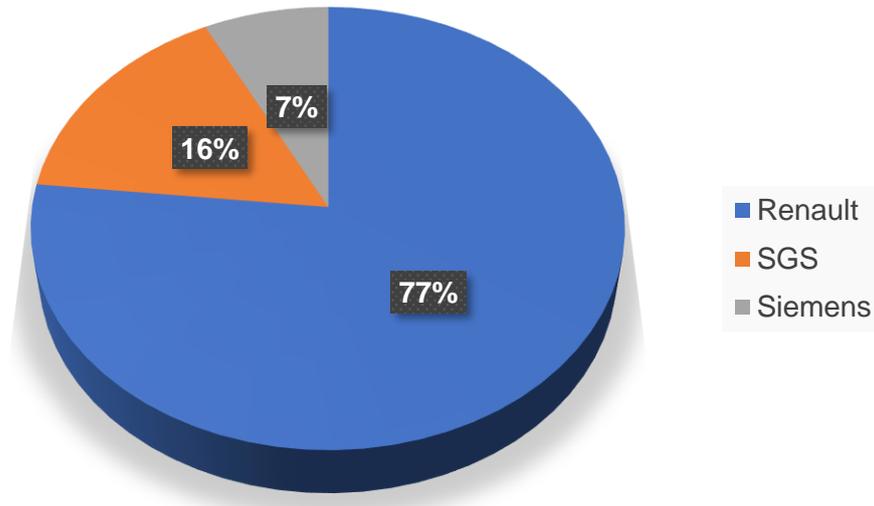


Figura 11. Porcentaje del presupuesto por participante

Fuente: Elaboración propia

3.7 Miembros del consorcio

Para cumplir con el presente proyecto, se ha contado con la participación de tres socios diferentes:

- El socio Renault se constituye en un importante candidato a ser sujeto del presente proyecto debido a la gran cantidad de motores eléctricos que tiene en operación. Este socio no dispone del conocimiento técnico necesario para implementar el proyecto.
- El socio SGS es especialista en el campo de la eficiencia energética. Tendrá a su cargo la implementación de una herramienta computacional para determinar la eficiencia de los motores eléctricos. Además, participará en el proceso de adquisición de datos de mediciones eléctricas que servirán de entradas para la herramienta computacional.
- El socio Siemens participará en calidad de asesor en el proyecto, recomendando de su gama de motores aquellos que cumplan con los niveles de eficiencia requeridos.

3.7.1 Participantes

Renault



Es una empresa francesa fabricante de automóviles de lujo, de turismo, autobuses y automóviles de carrera, fundada en 1898, que tiene sede en Boulogne-Billancourt. Su fábrica de motores de la ciudad de Cléon dispone de alrededor de 300 motores eléctricos de

bastante antigüedad cuya eficiencia energética necesita ser evaluada para tomar decisiones informadas sobre su posible reemplazo.

Las personas clave que participarán en el proyecto serán:

Una Project Manager: Será la coordinadora del proyecto. Tendrá como responsabilidad coordinar las tareas entre los diferentes socios y velar por que el proyecto se cumpla conforme el calendario y presupuesto.

Una Asistente 1 del Project Manager: Tendrá como responsabilidad servir de apoyo para el Project Manager. Deberá encargarse de elaborar comunicaciones para el Project Manager, organizar reuniones de trabajo y de coordinación.

Una Diseñadora y creadora de página web: Tendrá como responsabilidad diseñar y crear la página web del proyecto, en función de los criterios de los socios del proyecto y de la Directora de comunicaciones.

Una Creadora de contenido visual: Tendrá como responsabilidad crear y filmar contenido visual del desarrollo del proyecto, siguiendo los lineamientos de los socios y de la Directora de comunicaciones.

Técnicos eléctricos 1 y 2 - redactores de artículo técnico: Tendrán como responsabilidad participar en la redacción del artículo técnico a ser publicado en una revista de libre acceso. Además, participarán como apoyo para la adquisición de datos de mediciones eléctricas, aplicación de metodología para la determinación de la eficiencia energética de los motores eléctricos, y selección de motores de clase de eficiencia IE3.

Una Directora de comunicaciones: La directora de comunicaciones de Renault tiene 10 años ejerciendo tareas de comunicación y divulgación relacionadas con el ámbito técnico de la empresa. En este sentido, será responsable de dar a conocer los avances del proyecto trabajar de manera cercana con el diseñador de la página web del proyecto y del creador de contenido visual.



Programadora: Tiene como responsabilidad implementar la herramienta computacional para la determinación de la eficiencia energética de motores eléctricos en lenguaje Matlab, además de realizar las pruebas técnicas a la herramienta computacional.

Técnico eléctrico 1: Tiene como responsabilidad apoyar en el proceso de adquisición de instrumentación de medición, además de participar en el proceso de toma de datos de

mediciones eléctricas de motores eléctricos. Este técnico también participará en el proceso de asesoramiento en la toma de decisión de escoger las características de los motores eficientes.

Técnico eléctrico 2: Tiene como responsabilidad apoyar en el proceso de toma de datos de mediciones eléctricas de motores eléctricos. Este técnico también participará en el proceso de asesoramiento en la toma de decisión de escoger las características de los motores eficientes.

Técnico eléctrico 3 – redactor de artículo técnico: Tiene como responsabilidad apoyar en la elaboración del artículo técnico de libre acceso, y en el proceso de toma de datos de mediciones eléctricas de motores eléctricos. Este técnico también participará en el proceso de asesoramiento en la toma de decisión de escoger las características de los motores eficientes.



Experta motores eléctricos 1 – redactora artículo técnico: Tiene como responsabilidad colaborar en la redacción del artículo técnico a ser publicado en una revista de libre acceso. Además, participará en la toma de mediciones de parámetros eléctricos de los motores. Finalmente, actuará de líder en el proceso de asesoramiento para escoger los motores más idóneos en cuanto su clase de eficiencia.

Experto motores eléctricos 2: Participará en la toma de mediciones de parámetros eléctricos de los motores y participará en el proceso de asesoramiento para escoger los motores más idóneos en cuanto su clase de eficiencia.

Finalmente, en el proyecto no se considera la participación de terceras partes implicadas.

3.8 Ética y seguridad

En relación a la temática de la ética, este proyecto no implica el uso de:

- Embriones o fetos humanos.
- Células o tejidos humanos.
- Datos personales
- Animales

Por otro lado, en este proyecto participan únicamente países de la UE, por lo que no implica riesgos de problemas éticos internacionales.

La plantilla de la propuesta solicita indicar si el proyecto implicará problemas de seguridad conforme lo siguiente:

- Actividades o resultados provocarán problemas de seguridad: No
- Antecedentes o resultados con “información clasificada de la UE”: No

4 Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se ha presentado un proyecto de eficiencia energética en el que se ha planteado el desarrollo de una herramienta computacional basada en algoritmos genéticos para determinar la eficiencia de motores eléctricos. Empleando esta herramienta se ha determinado cuáles motores de Renault cumplen o no cumplen la categoría de eficiencia IE3 y se ha realizado un análisis costo - beneficio de cambiar los motores ineficientes por motores que cumplen el índice IE3.

4.1 Principales conclusiones

Como objetivo general del proyecto se plantea determinar la eficiencia energética de los motores eléctricos de la industria automotriz Renault, y tomar decisiones informadas sobre el reemplazo de motores ineficientes por motores eficientes de la categoría IE3, y su consecución viene dada mediante el desarrollo de una herramienta computacional basada en algoritmos genéticos, que permite estimar la eficiencia de los motores eléctricos.

- El primer objetivo específico planteado es desarrollar una herramienta computacional basada en algoritmos genéticos para determinar la eficiencia energética de los motores eléctricos. En este sentido se ha desarrollado una herramienta computacional basada en algoritmos genéticos, en lenguaje Matlab, para determinar la eficiencia energética de motores eléctricos en función de mediciones de parámetros eléctricos básicos, cuya adquisición de datos se puede realizar sin desmontar los motores eléctricos. Para ello se ha contado con el liderazgo de la empresa SGS, experta en la temática de eficiencia energética de motores eléctricos.
- El segundo objetivo específico planteado es evaluar la eficiencia energética de los motores eléctricos de Renault empleando la herramienta computacional desarrollada y determinar qué motores están operando bajo condiciones de eficiencia y cuáles no. En este sentido, se ha evaluado la eficiencia energética de 300 motores eléctricos de Renault empleando la herramienta computacional desarrollada. En función a los análisis realizados, se determinó que 188 motores no cumplen con el índice de eficiencia IE3, mientras que 112 sí cumplen con dicho índice.
- El tercer objetivo específico planteado es estimar la facturación anual del servicio eléctrico, en función a las eficiencias eléctricas determinadas, considerando los motores ineficientes y considerando el reemplazo de motores ineficientes con motores que cumplan el índice IE3. En relación a este objetivo, se ha estimado la facturación anual del servicio eléctrico en 10,57 MM€ considerando los motores ineficientes y 9,85 MM€

considerando el reemplazo de motores ineficientes. En este sentido, se obtiene un ahorro operativo anual de 0,72 MM€ por el reemplazo de motores ineficientes.

- El cuarto objetivo planteado es evaluar el costo de compra de nuevos motores que cumplan el índice IE3 y analizar el costo - beneficio de cambiar los motores ineficientes con nuevos motores que cumplan el índice IE3. En relación al cuarto objetivo específico, se estimó el costo de inversión de los nuevos motores eficientes en 3,07 MM€. Por otro lado, el análisis costo - beneficio realizado indica que es conveniente cambiar 165 motores de los 188 motores que no cumplen con el índice IE3. El ahorro neto estimado a lo largo de la vida útil de los motores, una vez realizada la compra de motores nuevos es de 4,19 MM€.

4.2 Líneas de trabajo futuro

En este proyecto se ha asumido que Francia ha adoptado la clase de eficiencia IE3 según la normativa del IEC. Para un futuro trabajo podría hacerse el análisis costo – beneficio del reemplazo de motores eléctricos ineficientes, asumiendo que el país ha adoptado la nueva clase de eficiencia IE4, que tiene mayor eficiencia que la clase IE3 analizada.

Para este trabajo se ha considerado que los motores eléctricos son de 4 polos, es decir que giran a una velocidad de 1800 rpm. En un futuro trabajo se podría considerar motores de diferentes números de polos, en cuyo caso la Figura 6 con las clases de eficiencia IE1, IE2, IE3, IE4 cambiaría de forma. Los motores de 2 polos giran a una velocidad de 3600 rpm, mientras que los motores de 6 polos giran a 1200 rpm.

A fines de determinar la eficiencia de los motores se ha empleado un programa de optimización heurística basado en el algoritmo genético, que mimetiza la teoría de la evolución biológica de Darwin. En un futuro trabajo podría utilizarse otro método de optimización heurística, para comparar los resultados de eficiencia obtenidos.

Referencias bibliográficas

- ABB. (2014). Low voltage motors - Motor guide. In *Abb* (Issue February). <https://bit.ly/2shdDza>
- Abdelhadi, B., Benoudjit, A., & Nait Said, N. (2004). Identification of Induction Machine Parameters Using a New Adaptive Genetic Algorithm. *Electric Power Components and Systems*, 32(8), 767–784. <https://doi.org/10.1080/15325000490466645>
- Chapman, S. (2012). *Máquinas Eléctricas* (Mc Graw Hill (Ed.); 5ta edición).
- Données et études statistiques. (2019). *Prix de l'électricité en France et dans l'Union européenne en 2019*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/prix-de-lelectricite-en-france-et-dans-lunion-europeenne-en-2019-0>
- Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). (2014). *IEC 60034-30-1:2014*.
- Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors. (2008). *IEC 60034-30*.
- European Commission. (2012). *Energy efficiency directive*. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
- Gharakhani, A. (2012). *Efficiency estimation of induction machines with limited measurements*. Concordia University.
- Holmquist, J. R., Rooks, J. A., & Richter, M. E. (2004). Practical Approach for Determining Motor Efficiency in the Field Using Calculated and Measured Values. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(1), 242–248. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821654>
- Hsu, J. S., Kueck, J. D., Olszewski, M., Casada, D. A., Otaduy, P. J., & Tolbert, L. M. (1996). Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods. *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, 1, 703–712. <https://doi.org/10.1109/IAS.1996.557115>
- IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement. (1978). *IEEE Std 118-1978*.
- IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators. (2004). *IEEE Std 112-2004*.

- Instituto Costarricense de Electricidad. (2017). *Buenas Prácticas de Eficiencia Energética para Motores Eléctricos Industriales*. 16. <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/99e8cc9f-13ae-43e2-95eb-1be48772ad60/Motores+Eléctricos+web.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IZQ1ISi&CVID=IZQ1ISi&CVID=IZQ1ISi>
- International Energy Agency. (2020). *World Energy Outlook 2020*.
- Kueck, J. D. (1996). *Assessment of methods for estimating motor efficiency, and load under field conditions*.
- Lu, B., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2008). A Nonintrusive and In-Service Motor-Efficiency Estimation Method Using Air-Gap Torque With Considerations of Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(6), 1666–1674. <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2006297>
- Mallawaarachchi, V. (2017). *Introduction to Genetic Algorithms — Including Example Code*. <https://towardsdatascience.com/introduction-to-genetic-algorithms-including-example-code-e396e98d8bf3>
- Mathworks. (2021). *Genetic Algorithm*. <https://www.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html>
- Ontario Hydro. (1990). *In-plant electric motor loading and efficiency techniques*.
- Schallenberg, J. C., Gonzalo, R., Izquierdo, P., Hernández Rodríguez, C., Unamunzaga, P., Ramón, F., Déniz, G., Díaz, M., Delia, T., Pérez, C., Martel Rodríguez, G., Pardilla, J., Vicente, F., & Ortin, S. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*.
- Siraki, A. G., & Pillay, P. (2012). An In Situ Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Working With Unbalanced Supplies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(1), 85–95. <https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2168563>
- Sousa, V. (2014). *Procedimiento para determinar la eficiencia de motores asíncronos en presencia de desbalance y armónicos en la tensión*. Universidad Central de las Villas - Santa Clara.
- Standard methods for determining losses and efficiency from tests. (2007). *IEC 60034-2-1-2007*.
- Subramanian, S., & Bhuvaneshwari, R. (2006). Evolutionary Programming Based Determination of Induction Motor Efficiency. *Electric Power Components and Systems*,

34(5), 565–576. <https://doi.org/10.1080/15325000500360835>

U.S. Department of Energy. (2011). *MotorMaster+International*.

UNIR. (2021). *4 metodologías para la gestión de proyectos que debes conocer*.
<https://www.unir.net/empresa/revista/metodologias-gestion-proyectos/>

Ursem, R. K., & Vadstrup, P. (2003). Parameter identification of induction motors using differential evolution. *The 2003 Congress on Evolutionary Computation, 2003. CEC '03.*, 2, 790–796. <https://doi.org/10.1109/CEC.2003.1299748>

World Energy Council. (2008). *Energy Efficiency Policies around the World: Review and Evaluation*.

Zamboti Fortes, M., Hugo Ferreira, V., & Palma Francisco Coelho, A. (2013). The Induction Motor Parameter Estimation Using Genetic Algorithm. *IEEE Latin America Transactions*, 11(5), 1273–1278. <https://doi.org/10.1109/TLA.2013.6684404>