

Evaluación de factibilidad técnica de la producción cordobesa de partes mecánicas de aerogeneradores.

Algañaraz, Mariel. E.*; Scagliotti Olmedo, M., Castagno, Santiago N.**, Bonaiuti, Ricardo., Alfarano, Javier; Nacuse, Nasif. O.

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Córdoba

5016 - Córdoba. República Argentina

*marielalgaaraz@outlook.com ** santicastagno@gmail.com

RESUMEN

En Argentina se instalaron 73 parques eólicos en el contexto de la Ley 27.191. Considerando que la mayor generación de empleo está dada durante la manufactura de los equipos y que el 97,26% de ellos es tecnología europea y de acuerdo al marco que establecen las metas de no emisión de GEI establecidas en el Acuerdo de París es que se proyecta que la energía eólica estará en alza sostenida. El objetivo de este trabajo es determinar si es posible desde el punto de vista técnico fabricar componentes de generadores eólicos en la provincia de Córdoba, con el propósito macro de dar a las metalmecánicas cordobesas una herramienta para evaluar los propios recursos.

La metodología empleada para éste trabajo se centró en el estudio de los componentes de la caja multiplicadora tipo, determinando los parámetros de fabricación para un posterior contraste con los recursos disponibles en campo a través de entrevistas a metalmecánicas de la provincia de Córdoba.

Palabras Claves: Energía Eólica – Epicycloidal – Engranajes – Aerogenerador – Argentina – Córdoba

ABSTRACT

In Argentina, 73 wind farms were installed because of the Law 27.191. Considering that the equipment manufacture is the one that generates the greatest employment amount, that 97,26% of the equipment is imported from Europe, and according to the framework established by the non-GHG emission goals established in the Paris Agreement, it is projected that wind power will be on a sustained rise. The objective of this work is to determine if it is possible from a technical point of view to manufacture components of wind generators in the province of Córdoba, with the macro purpose of giving the Cordovan metalworking companies a tool to evaluate their own resources.

The methodology used for this work focuses on the study of the average gearbox and its components to determine the manufacturing parameters for a subsequent contrast with the resources available in the field through interviews with metal mechanics in the province of Córdoba.

Keywords: Wind energy – Epicycloidal – Gears – Wind - Generator – Argentina - Cordoba

1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica se ha expandido a grandes saltos en los últimos 20 años, comenzó el siglo como fuente de nicho en Europa y los EEUU y terminó 2019 como fuente principal de energía limpia y competitiva en cuanto a costos en el mundo alcanzando un hito global de 651 GW acumulados de capacidad instalada [1].

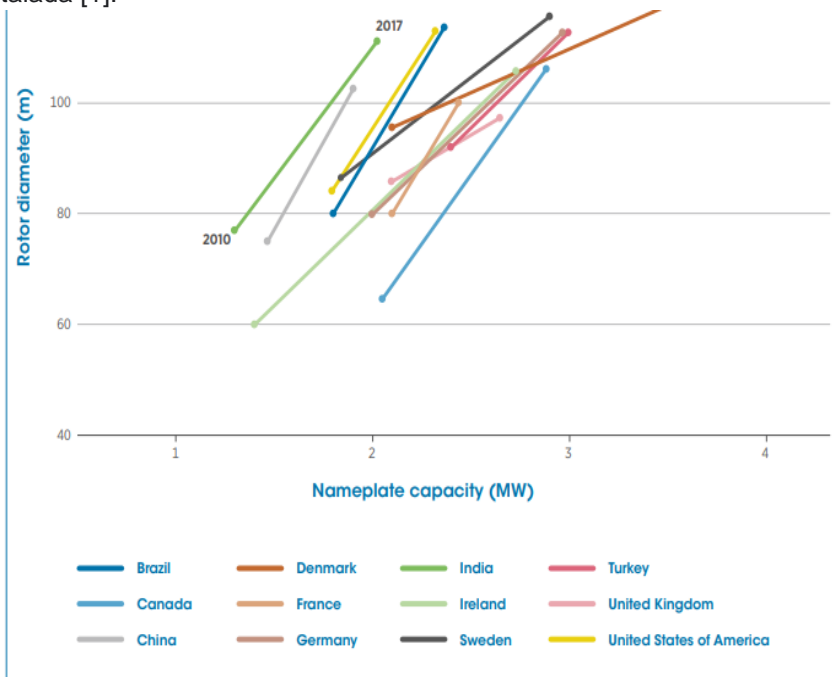


Figura 1: Evolución del promedio ponderado del diámetro del rotor y de la capacidad nominal, 2010 – 2018. Fuente: Basado CanWEA 2016; IEA Wind 2019, Wiser and Bollinger 2018, Danish Energy Agency 2019, and Wood Mackenzie, 2019.

Este rápido crecimiento del mercado eólico terrestre se explica parcialmente por un aumento en el diámetro de los rotores con el consecuente incremento de capacidad de las turbinas, que funcionan capturando la energía cinética del viento convirtiéndola en energía rotacional en el rotor a través del eje principal, la caja de engranajes (de acuerdo al tipo de turbina sujeto de éste trabajo) y el generador. La potencia contenida en el viento entonces, está determinada según:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Puede observarse que el área (A) “área de barrido del rotor” es el único factor de diseño que interfiere en la potencia que podría extraerse de la energía cinética del viento.

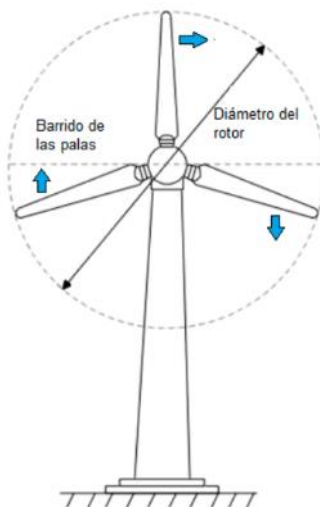


Figura 2: Vista frontal de Aerogenerador. Esquema Rotor.

Los otros factores son no constructivos y dependientes del sitio de emplazamiento siendo ρ la densidad del aire y v la velocidad del viento que impacta en el rotor.

Las turbinas eólicas instaladas tienen una capacidad de potencia que oscila mundialmente en 1,9 MW a 3,5 MW [2] con diámetros de rotor de 97 a 118 m.

1.1 Esquema de funcionamiento

Al impactar en las aspas la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica, que hace girar el rotor. El rotor está conectado mediante un sistema de rodamiento al eje principal o también llamado eje lento, que transmite esa energía mecánica a la caja de engranajes que, en etapas, aumenta la velocidad de giro del eje, transmitiendo esta energía al generador a través del eje rápido.

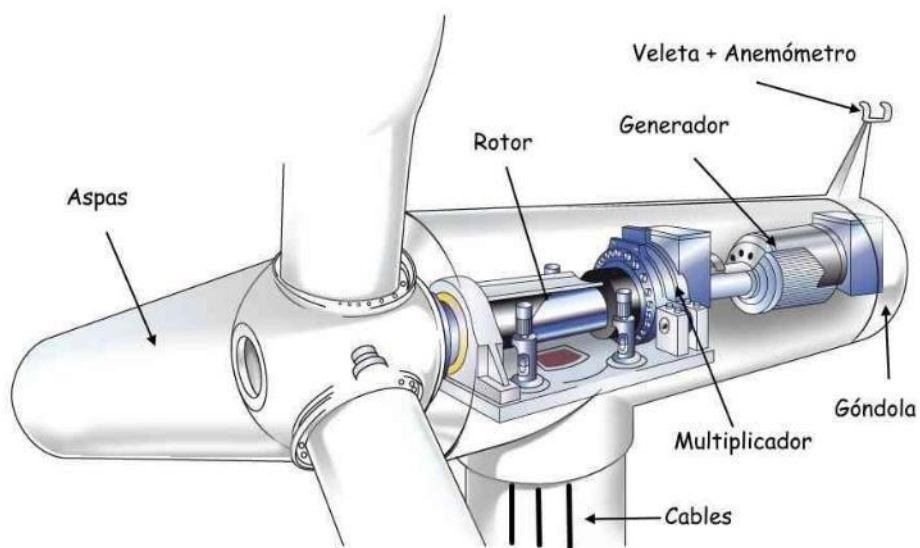


Figura 8: Sistema de transmisión.

Las cajas multiplicadoras ajustan la velocidad de rotación del rotor de baja velocidad conectado al buje – rotor que gira a razón de 3 a 35 rpm, con la velocidad de rotación del generador de alta velocidad que en un sistema de 50 Hz implica 1500 rpm y en uno de 60 Hz 1800 rpm [9] es necesario que la caja multiplicadora funcione en varias etapas para poder cubrir las diversas condiciones de viento que puedan presentarse.

El generador convierte la energía mecánica que suministra el eje de transmisión de etapa rápida, a energía eléctrica, es el “cliente interno” del sistema caja, por ende depende del tipo de generador, la configuración de la caja.

Existen 4 tipos de generadores útiles, quienes representan mayor cuota de mercado son el GIDA generador de inducción de doble alimentación con un 30% de la cuota de mercado y el FRC (full rated converter) generador con convertidor completo, también llamado máquina de inducción de jaula de ardilla. [9]

1.2 Mercado

En Argentina, según el relevo efectuado, el 58,8% de los aerogeneradores tienen potencias entre 3,1 y 4 MW. Siendo los más frecuentes los que tienen entre 3,1 y 3,5 MW. Constituye la moda de los aerogeneradores instalados el modelo Vestas V126-3.45.

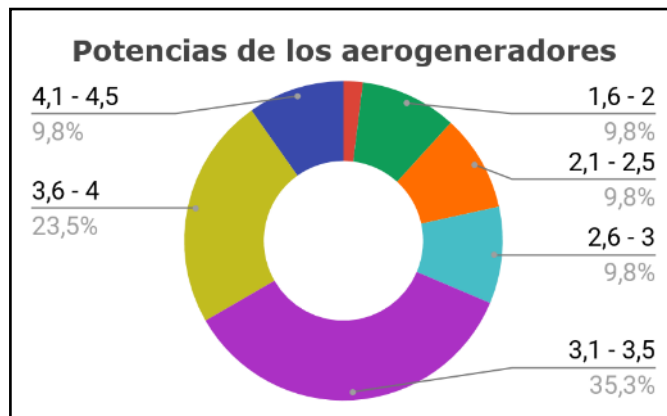


Figura 3: Distribución porcentual de potencias de aerogeneradores instaladas en Argentina, programa RenovAr y MATER. Fuente: Elaboración propia en base a CAMMESA.

El mercado eólico se ha visto acelerado en los últimos 10 años y se prevé sostenga su crecimiento a ritmo continuo, ya que para los 2 °C de límite al que se comprometieron los países en el acuerdo de París a 2030, debería triplicarse la capacidad de energía eólica terrestre mundial y aumentar 10 veces la capacidad instalada de energía [3], esta tendencia en alza está relacionada al hecho de que la energía eólica cuesta cada vez menos. El LCOE promedio de los parques eólicos terrestres recién puestos en marcha en Dinamarca, Alemania, Suecia y los Estados Unidos en 2018 fueron entre un 69% y un 83% más bajos que los instalados en 1983. Tanto los Estados Unidos como China tuvieron un promedio de LCOE de 0,05 dólares por kWh en 2018, mientras que Canadá, Dinamarca, India, el Reino Unido y Brasil promediaron 0,06 dólares/kWh en 2018 [2]. El promedio ponderado mundial de LCOE para la energía eólica terrestre se redujo en un 82% entre 1983 y 2018, período en el que la capacidad instalada acumulada aumentó a 540 GW [4].

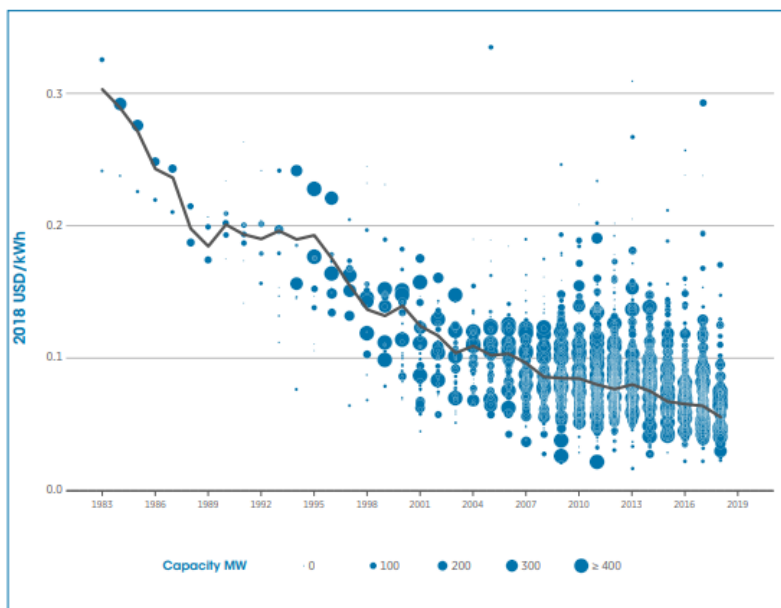


Figura 4: LCOE de los proyectos eólicos terrestres y promedio ponderado mundial por año de puesta en marcha. 1983 – 2018. Fuente: IRENA, (2018) Renewable Power Generation Costs.

De ese costo total, los costos de O&M suelen representar entre el 20 y el 25%. Los datos españoles indican que al menos del 60% de esta cantidad va estrictamente a O&M de la turbina y las instalaciones, costos de la mano de obra y piezas de repuesto. El 40% restante se divide en partes iguales entre el seguro, el alquiler de la tierra y los gastos generales [2]. Al aumentar la cantidad de parques eólicos, aumenta la necesidad de servicios, mano de obra y repuestos ligados a ésta tecnología, diferentes investigaciones de mercado como la de Zion 2019, proyecta que el mercado global de O&M para las turbinas eólicas aumentará de 12 000 USD millones en 2018 a 21 000 USD millones en 2025, lo que equivale a un incremento anual del 8.54 %.[5]

A nivel mundial la generación de empleo en el sector eólico significó en 2019 la creación de 11 millones de puestos de trabajo [6]. Este empleo se genera principalmente en el proceso de

manufactura de la turbina eólica, que es significativamente más algo que la cantidad de empleo generado como usuarios de la tecnología instalada en parques:



Figura 6: Cantidad de empleo en energía eólica. Fuente: Subsecretaría De Energías Renovables. Ministerio De Energía (2018) Generación De Empleo. Programa RenovAr y MATER

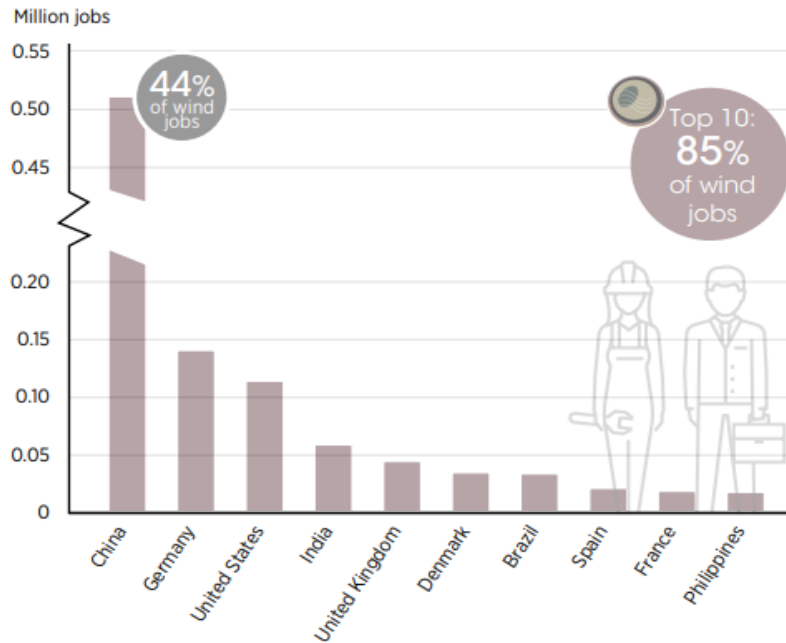


Figura 5: Top 10 de generación de empleo en energía eólica. Fuente: IRENA (2019) Renewable Energy and Jobs Annual Review.

El objetivo de éste trabajo se centra en determinar si es posible desde el punto de vista técnico fabricar componentes de generadores eólicos en la provincia de Córdoba, Argentina, con el propósito macro de dar a las metalmecánicas cordobesas una herramienta para evaluar los propios recursos, ya que durante los últimos 10 años se han instalado 73 parques eólicos de gran potencia en el país, en el contexto de las rondas del programa RenovAR incentivado por la Ley 29.191 de Fomento a Renovables.

De la totalidad de parques instalados el 58.8% de los aerogeneradores relevados fueron producidos bajo la marca Vestas, una compañía danesa dedicada a la fabricación, venta, instalación y mantenimiento de los mismos [7].

Marcas de los aerogeneradores

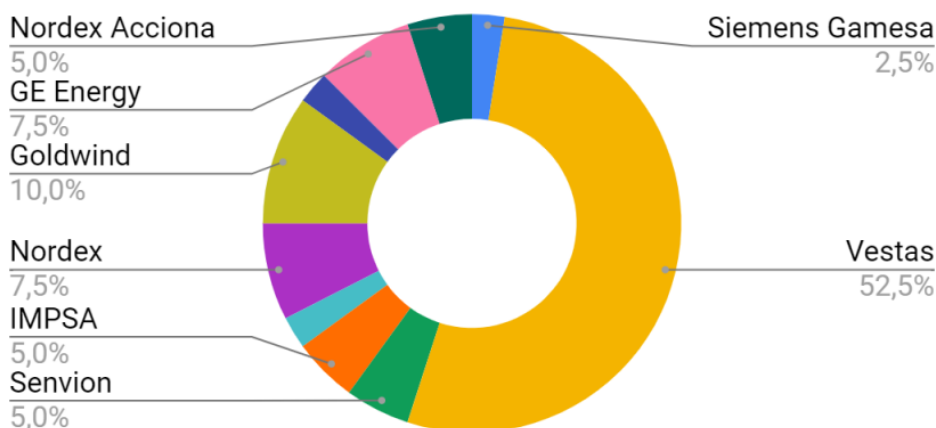


Figura 7: Distribución porcentual en base a fabricantes de turbinas instaladas en Argentina, programa RenovAr y MATER.

A continuación, se pueden ver en la primer tabla las manufactureras de componentes eólicos [8] sondeadas en base a búsqueda digital, dentro del territorio argentino.

Tabla 1: Manufactureras de tecnologías en Argentina.

MANUFACTURERAS DE COMPONENTES DE ALTA POTENCIA		
NRG Patagonia	Comodoro Rivadavia - Chubut	1,5 MW
IMPSA	Mendoza	2 MW

Tabla 2: Ensambladores de Nacelles en Argentina

Manufacturera	Ubicación
Nordex Group (Nordex-Acciona)	Córdoba- Córdoba-Av. Fuerza Aerea Argentina 5500
Vestas-Newsan	Buenos Aires- Campana- Av. Cnel. Larrabure
IMPSA	Mendoza-Godoy Cruz-Carril Rodríguez Peña 2451, M5503

2. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo consistió en una primera etapa con el proceso de interiorización acerca del funcionamiento del equipo, de macro a micro, se procedió a distinguir las partes componentes y entender cual es la función del componente en el conjunto.

Seguidamente, se tuvo la intención de dar paso al cálculo de los diámetros de los engranajes involucrados en la caja, con la intención de obtener los diámetros necesarios para obtener la potencia moda relevada en el estudio de mercado. Este cálculo se abandonó, por la complejidad del mismo y los plazos del proyecto.

Se procedió entonces a relevar antecedentes en el cálculo, obteniéndose los datos presentados en la sección 2.1 Caja de engranajes. En paralelo a la cuestión técnica, se encontró útil la profundización en la cuestión normativa respecto del diseño de los aerogeneradores, para ello se procedió a capacitación internacional no específica, lo hallado respecto a normativa se presenta en el apartado 2.2 Normativa para el diseño.

En una instancia superior se pretende que el apartado 2.1 sea discutido con el sector metalmecánico respecto a los recursos disponibles y el apartado 2.2 con las cámaras representantes. Es a partir de ese contraste valorativo que se estima será posible determinar la factibilidad de la producción cordobesa de estos equipos.

2.1 Caja de engranajes

Hay dos tipos de configuraciones posibles para turbinas eólicas, caja de engranajes de ejes paralelos y cajas de engranajes de ejes planetarios, las configuraciones suelen combinarse para

optimizar la eficiencia del diseño, por ejemplo en el modelo moda, la caja es de 3 niveles, 2 etapas planetarias y una etapa helicoidal [10].

Las cajas multiplicadoras de engranajes paralelos pueden fabricarse con relaciones de transmisión de hasta 1:5 por etapa, este tipo de cajas al ser más sencillas en cuanto al diseño respecto de las cajas planetarias, representan un coste menor, por lo que son las preferidas para turbinas eólicas de hasta 500 kW. [11] Las cajas multiplicadoras de engranajes planetarios tienen una relación de transmisión de hasta 1:12, son usadas con varias etapas para potencias mayores a 1MW.

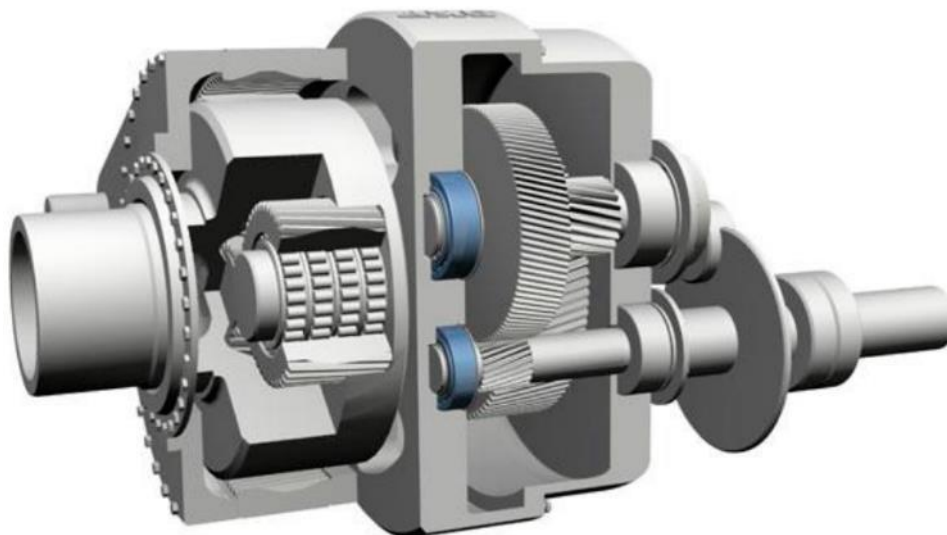


Figura 9: Ejemplo de caja multiplicadora de un aerogenerador. Fuente; J.G.Slootweg. *Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations. Investigación. IEEE; 2003.*

Para la fabricación de los engranajes de las multiplicadoras se utiliza fundamentalmente acero aleado de dureza 30-42 RC. Una vez fabricadas las ruedas dentadas estas se someten a un tratamiento de cementado mediante el cual aumenta el contenido de carbono en la superficie y se logran durezas del orden de 58-63RC. Con este procedimiento se logra que el núcleo de la rueda sea dúctil mientras que la superficie debido a su dureza posea una alta durabilidad. [10]

1	Carcasa
2	Sol
3	Rotor de Turbina
4	Porta satélites
5	Corona
6	Satélite
7	Eje solar
8	Rueda
9	Eje central
10	Eje de alta velocidad

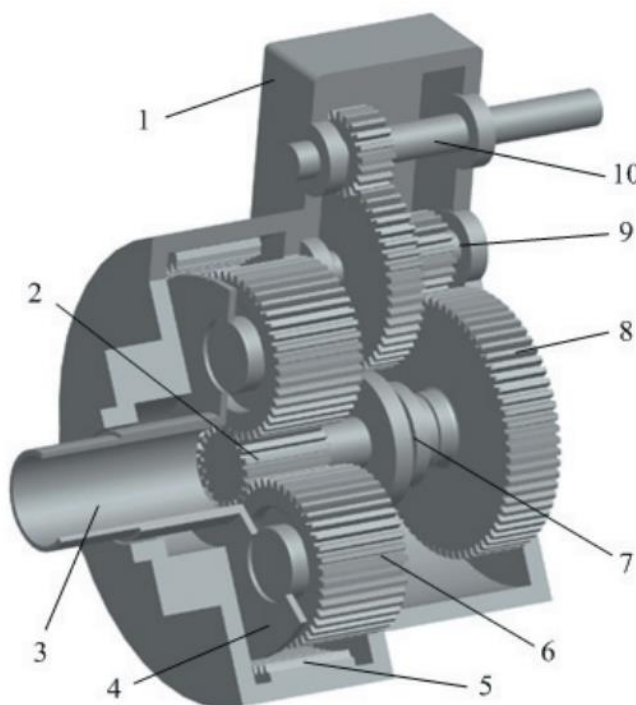


Figura 10: Estructura de una caja multiplicadora de un aerogenerador. Fuente: ISO/IEC 17025, (2005), *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.*

2.2 Normativa de diseño

La Norma IEC 61400 [12] define los requisitos de diseño para aerogeneradores, a continuación se presenta un extracto de estos requisitos.

Consideraciones para la fabricación de engranajes de la caja multiplicadora:

- Se diseñarán utilizando métodos de cálculo apropiados como se describe desde ISO 6336-1 hasta ISO 6336-3. Los valores de resistencia del material se derivarán de acuerdo con ISO 6336-5 y deberá corresponder al menos a la calidad MQ. Todas las tolerancias de fabricación relevantes y los desplazamientos se combinarán para el cálculo del factor de distribución de carga frontal según ISO 6336-1.
- El factor de seguridad SH para picaduras se calculará de acuerdo con ISO 6336-2 utilizando cualquiera de los métodos A o B. La regla directa del minero se aplicará para el cálculo de fatiga. La seguridad calculada el factor SH será 1,2. Este factor de seguridad SH incluye el factor de seguridad parcial por consecuencia, material y carga.
- El factor de seguridad SF para la flexión de los dientes se calculará de acuerdo con el método ISO 6336-3 A o B. Se utilizará la regla directa del minero. El factor de seguridad calculado SF debe ser al menos 1,45. Este factor de seguridad SF incluye el factor de seguridad parcial para consecuencia, material y carga.
- Para el desgaste, las cargas de fatiga no tienen importancia, pero incluso pocas cargas transitorias altas pueden iniciar esta falla especialmente con un acabado superficial insuficiente y a una alta temperatura del lubricante. La seguridad contra el desgaste se calculará utilizando un método relevante, por ejemplo como se describe en ISO / TR 13989-1. El factor de seguridad calculado SS debe ser al menos 1,3.
- Se debe tener especial cuidado para garantizar que los sistemas de enfriamiento y filtración puedan mantener estado de lubricación relevante en todo el rango de temperatura de funcionamiento siguiendo los especificados procedimientos de mantenimiento.

3. RESULTADOS

Para el dimensionamiento de la caja multiplicadora, se analizaron tesis, papers y documentos técnicos de los que obtener datos de los parámetros de fabricación para analizar en campo la capacidad técnica de las metalmecánicas. Se toma como base el diseño de la multiplicadora para una turbina eólica de 2,5 Mw con una etapa planetaria y dos etapas paralelas (Moya Rodríguez 2012) [12].

Datos:

Potencia 2500 Kw

rpm de entrada = 14, 7 rpm

rpm de salida = 1500

u total = 102,48

Método de Cálculo ISO 6336 2006. Método B

Material Acero 18CrNiMo 7-6 Templado y cementado para ambas ruedas ISO 6336-5 para ambas ruedas.

Lubricación por barboteo ACEITE ISO VG – 220

Vida 30000 horas

nsf y np factores de seguridad a la fatiga por flexión y a la picadura respectivamente.

Tabla 3: Tabla resumen de parámetros (Moya Rodríguez, 2012)

Tipo de engranaje		m [mm]	b[°]	B [mm]	Z	u	n _{sf} pie	n _p flanco	rpm in	rpm out
Fase 1 (planetario) aw= 1170.59	Planeta	25	20	750	29	6,1	2.0753	1.4961	14,7	89,6
	Satélites				59		1.4841	1.6988		
	Rueda				-148		3.2619	4.6910		
Fase 2 (paralelo) aw= 1096.66	Piñón	16	10	500	27	4	1.4003	1.3046	89,1	358,6
	Corona				108		1.4324	1.3751		
Fase 3 (paralelo) Aw= 830.05	Piñón Corona	12	20	220	25 105	4,2	1.5422 1.5658	1.2105 1.2.650	356	1504

Debido a la situación coyuntural actual, fue posible obtener un acercamiento a la maquinaria de una sólo metamecánica dentro del rango geográfico de estudio, resultando POSITIVA la factibilidad en cuanto a los requerimientos técnicos que se resumen en el cuadro anterior.

Sin embargo, estos resultados no son concluyentes, dado que existe normativa internacional para el diseño que debe cumplirse en el rubro, por lo que, aunque la factibilidad exclusivamente técnica, sea posible, está la cuestión normativa, que requerirá a priori, de un estudio más profundo y específico.

3. CONCLUSIONES.

Debido al porcentaje de avance del trabajo, las conclusiones aquí expuestas son parciales y no concluyentes, esto se debe a que la etapa última que consiste en el contraste de los recursos disponibles por las partes interesadas y los parámetros de fabricación de componentes esto tenía proyectado realizarse a través de visitas a metalmecánicas y entrevistas a las partes interesadas, pero debido a la coyuntura actual que nos atraviesa se ha visto imposibilitado.

Se resume:

- 1) La energía eólica es una tecnología en continuo desarrollo que organismos proyectan mantenga la tendencia de “en alza” en la cuota del mercado energético a nivel mundial y también en Argentina.
- 2) La generación de empleo que podría generar este nuevo nicho de mercado es una posibilidad que requiere ser estudiada y profundizada más allá que como proveedor de servicios.
- 3) Se requieren importantes inversiones para ingresar al mercado. La manufactura de componentes eólicos es una posibilidad que entendemos requiere ser acompañada por el Estado en el nivel que compete.
- 4) Las empresas responsables en desarrollar proyectos deben utilizar por norma, únicamente máquinas y equipos que hayan sido probados y certificados por instituciones independientes que estén acreditadas por la norma ISO/IEC 17025:2005 y de acuerdo a la norma IEC 61400.[12]
- 5) De la conclusión (4) se desprende que aunque la conclusión de éste trabajo, posterior a contrastación en campo con los recursos existentes, sea que efectivamente se tiene la capacidad de producir componentes de turbinas desde un punto de vista técnico respecto de la maquinaria, se requiere profundizar el estudio sobre la capacidad de las empresas de poder cumplir con los requisitos de la norma IEC 61400, lo que abre un nuevo interrogante: ¿Es posible certificar estas normas para nuestras metalmecánicas?

La conclusión última de éste trabajo es el hecho de que la factibilidad de hacer posible explotar este nuevo nicho de mercado no depende exclusivamente de los parámetros técnicos, en cuanto a factibilidad o no factibilidad. Sino que para éste nuevo mercado se potencia la necesidad de hacer una inversión importante en crear, aprender, desarrollar y acompañar para generar, usar y aprovechar nuestras capacidades para con nuestro recurso eólico, que requiere de trabajo sinérgico entre la industria y el Estado.

Cabe un análisis más profundo respecto a la normativa, lo que abre la posibilidad de estudiar si es posible crear mercado interno con normativas también internas como posibilidad, o estudiar si es factible la implementación de las normativas internacionales en la manufactura en el territorio.

4. REFERENCIAS.

- [1] World Wind Energy Association WWEA (2019) *Preliminary Statistics*
- [2] Søren Krohn (2019) *The Economics of Wind Energy A report by the European Wind Energy Association.*
- [3] IRENA (2015) *REthinking Energy: Renewable Energy and Climate Change.*
- [4] GWEC (2019) *Global Wind Energy Report.*
- [5] Zion Market Research (2019) *Global Wind Turbine Operations and Maintenance Market Is Expected To Reach Around USD 21 Billion By 2025.*
- [6] IRENA (2019) *Renewable Energy and Jobs Annual Review.*
- [7] Algañaraz, Mariel. Elizabeth.*; Scagliotti Olmedo, Miguel., Castagno, Santiago Néstor. (mayo, 2020). Relevo en base a Rondas RenovAR y MATER.
- [8] Extraído de la lista de fabricantes que participan en la lista de fortalecimiento del INTI.
- [9] Extraído de ETRELA
- [10] Moya Rodríguez, Jorge Laureano; Chagoyén Méndez, César A.; Ayushjav, Byambajargal ; Velázquez Pérez, José Alberto; Machado Rodríguez, Ángel S.; Goytisoló Espinosa, Rafael A. (2012) *Diseño de caja multiplicadora para turbinas eólicas.* Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Villa Clara, Cuba.
- [11] Ospina, Gina, Bogardo, Gerardo (2017). *Modelado de turbina eólica con generador de inducción para análisis de estabilidad de señal pequeña.* Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [12] ISO/IEC 17025, (2005), *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.*

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a Jorge Laureano Moya Rodríguez, César A. Chagoyén Méndez, Luis Navoni, Juan Mastrolinardo y a Brigadier San Martín, por los importantes aportes para con este artículo y trabajo de campo.

También mencionar a la Dra. Clementi L., por su importante aporte a la rama de trabajo y al Dr. Barulich D. y la Dra. Dardati P. por ser docentes estimulantes para con la especialidad de los autores, a la Mgter. Carrizo B. por apoyar el desarrollo de nuevas ramas en cuanto a la investigación y al Ing. Cagnolo F. por ser un grato compañero en el campo eólico.

Por último También agradecer a nuestra querida Universidad Tecnológica Nacional, facultad regional Córdoba, por el apoyo constante para con el desarrollo de nuevos y jóvenes investigadores y a todo el personal que nos ha brindado su apoyo de una u otra manera para con este, nuestro primer artículo.