

PROYECTO NÚMERO P10

1.- Título del proyecto

Diseño, Análisis y Construcción de Generadores Eléctricos Síncronos de Imanes Permanentes y de Inducción Doblemente Alimentados para Plantas Eólicas.

2.- Tipo de proyecto

Investigación aplicada y desarrollo tecnológico

3.- Instituciones y empresas participantes

Instituto Tecnológico de la Laguna
No. RENIECYT: 033-22
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Dirección: Blvd. Revolución y Calz. Cuauhtemoc s/n, Col. Centro, 27000 Torreón
Coahuila, MEXICO.
Ingeniería y Manufacturas Eléctricas SA de CV
No. RENIECYT: 2011/14152
Dirección: Av. Inde No. 817, Parque Industrial Lagunero, 35078 Gómez Palacio
Durango, MEXICO.

4.- Líder técnico

Dr. Marco Antonio Arjona López

5.- Líder administrativo del proyecto

CP Mireya Hernández Gaytán

6.- Principales integrantes del equipo de trabajo

Investigadores:

No.	Nombre	Actividad	CVU	SNI
1	Dr. Marco Antonio Arjona López	Responsable Técnico/investigador	12000	2
2	Dra. Concepción Hernández Flores	Investigadora	240314	1
3	MC Ricardo Vargas Salas	Investigador	278644	
4	MC Carlos Alberto Morales Bazán	Investigador	438942	--

Personal de apoyo del ITL y de la empresa participante:

No.	Nombre	Actividad	CVU	SNI
1	Ing. José Santos Jasso Peña	Técnico		--
2	Ing. Marco Antonio de la Cruz Garibay	Técnico		--
3	CP Mireya Hernández Gaytán	Responsable Administrativo	354105	--
4	CP Marcela Thomae	Auxiliar contable		
5	Ing. Carlos Puente	Diseñador de Transformadores de Empresa		--
6	Ing. Karla Puente	Diseñador de Transformadores de Empresa		--

Estudiantes

No.	Nombre	Actividad	CVU
1	MC Fernando Arturo Ramírez Sánchez	Doctorado	299844
2	MC Adolfo González Castañeda	Doctorado	268624
3	Tesista de doctorado (por definir)	Doctorado	
4	Tesista de doctorado (por definir)	Doctorado	
5	Ing. Daniel A. M. Morales	Maestría	513408
6	Ing Jesús González Domínguez	Maestría	555721
7	Tesista de maestría (por definir)	Maestría	
8	Tesista de maestría (por definir)	Maestría	
9	Tesista de Licenciatura (por definir)	Licenciatura	
10	Tesista de Licenciatura (por definir)	Licenciatura	
11	Tesista de Licenciatura (por definir)	Licenciatura	

7.- Antecedentes (estado del arte) y justificación

El consumo global de energía eléctrica se ha incrementado notablemente desde la revolución industrial y con el aumento de nuestros estándares de vida; este consumo ha sido más fuerte en los países industrializados. En la actualidad, la mayor parte de la energía eléctrica total generada proviene de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), un porcentaje mínimo se genera con energía nuclear y es poca la energía que proviene de fuentes de energía renovable (principalmente hidráulica y eólica); estos números están cambiando rápidamente debido al auge que tienen las políticas para la disminución de los gases de efecto invernadero a nivel mundial y sobre todo en los países en desarrollo, como México. Se estima que la fuente de Uranio empleado en plantas generadoras nucleares durará 50 años, el petróleo no durará más de 100 años, el gas 150 años, y el carbón 200 años. También se tiene conocimiento de que no sólo la dependencia energética en los combustibles fósiles es la causante de la contaminación ambiental, que se ha convertido en el tema dominante de nuestra sociedad; adicionalmente, se tiene la contaminación urbana, que se debe principalmente al uso excesivo de los vehículos. Debido al impacto de las fuentes de contaminación en el medio ambiente, desde hace varias décadas los países en desarrollo iniciaron con el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables. Este tipo de fuentes se pueden definir como aquellas que se encuentran en nuestro planeta, y que están disponibles de manera intermitente, diurna, y sobre todo que no se agotan. Algunas de las fuentes de energía renovable son: termosolar, fotovoltaica, eólica, biomasa, hidráulica e hidrogeno [1]. En la actualidad, se tiene una tendencia cada día más fuerte para cambiar a fuentes de energía renovables, las cuales se caracterizan por ser ecológicamente limpias. Nuestro planeta tiene un potencial enorme de energía eólica. Se estima que si se lograra aprovechar sólo el 10% de esa energía eólica sería suficiente para

abastecer la demanda de energía mundial. Los avances tecnológicos logrados en turbinas eólicas de velocidad variable, electrónica de potencia, inversores y controles han logrado que la fuente de energía eólica sea muy competitiva con respecto a la proveniente del carbón y a la del gas natural. Una planta de generación de energía eléctrica del tipo eólica está integrada por una turbina, una caja de engranes (opcional), un generador eléctrico, un convertidor electrónico, y un transformador, entre otros componentes. La función de la turbina es la de convertir la energía de la velocidad del viento en energía mecánica. El generador eléctrico convierte esa energía mecánica en energía eléctrica. La función del convertidor electrónico es proveer un medio que permita el acondicionamiento de la energía generada y su envío a la carga local o a la red eléctrica. Finalmente, se tiene al transformador que eleva la tensión del voltaje entregada por el inversor electrónico al nivel de la red eléctrica de transmisión. En las últimas dos décadas se ha tenido un crecimiento exponencial en la capacidad instalada de plantas eólicas a nivel mundial. Las turbinas eólicas pueden ser de eje horizontal o de eje vertical, siendo las más comunes las de eje horizontal, y usualmente están compuestas por tres aspas porque esta configuración permite obtener el máximo valor del coeficiente de potencia del rotor, según fue demostrado por Betz, y la relación de velocidad de la turbina a la velocidad del viento normalmente se selecciona para que esté en el rango de 5 a 8 [2]. Con la finalidad de reducir el tamaño del generador, el sistema de generación eólica normalmente usa una caja de engranes o transmisión para incrementar la velocidad de la turbina eólica. Sin embargo, los sistemas de transmisión mecánicos de múltiples etapas de la caja de engranes no solamente incrementan el ruido y las pérdidas de potencia sino que también necesitan mantenimiento, lo que reduce la confiabilidad del sistema eólico. Los sistemas que no emplean cajas de engranes y que usan generadores eléctricos de imanes permanentes sin escobillas son de mayor eficiencia, sin embargo el peso y diámetro representan limitaciones en aerogeneradores [3]. En México, existe un número importante de granjas eólicas en operación y otras más están en planificación de ser construidas. Ante el incremento inminente de la capacidad instalada, se va a requerir estudiar la interacción de estas granjas eólicas con el sistema de potencia interconectado nacional e impulsar la investigación y el desarrollo tecnológico de México en esta área. Esto requiere del desarrollo de diseños propios de los generadores empleados y de sus turbinas eólicas. Por supuesto que ya hay en la literatura un número importante de propuestas [4, 5, 6, 7]. La conversión de la energía mecánica en eléctrica se puede llevar a cabo mediante el uso de generadores de inducción con acoplamiento directo a la red eléctrica, generador de inducción con convertidor completo, generador de inducción doblemente alimentado, y mediante generadores síncronos, que pueden estar totalmente alimentados y con excitación de campo o bien un generador síncrono de imanes permanentes con convertidor completo [2]. Por lo anterior, las máquinas eléctricas tienen un papel fundamental en los aerogeneradores, y eso justifica realizar investigación en este tipo de fuente renovable de energía. En la actualidad los tipos de máquinas eléctricas que más se utilizan en los aerogeneradores son los generadores síncronos de imanes permanentes y los generadores de inducción doblemente alimentados; también se pueden encontrar generadores síncronos convencionales y generadores de flujo axial, entre otros. En los generadores de inducción doblemente alimentados, el estator está directamente conectado al transformador de distribución y el rotor se alimenta con un convertidor completo, cuya capacidad es una fracción de la potencia del generador (aproximadamente el 30%), lo cual es un factor importante en el costo del sistema eólico. Este tipo de generadores tienen un elevado nivel de utilización en los aerogeneradores actuales [8]. Adicionalmente el generador tiene la ventaja de tener un control más simple debido a que la corriente de magnetización es prácticamente constante sin importar la frecuencia del rotor. La función del control es la de sincronizar la corriente del rotor con respecto a la referencia del estator. También el factor de potencia se puede controlar desde el estator o bien desde el rotor de este tipo de máquina eléctrica. El generador de inducción también ayuda con compensaciones rápidas de potencia reactiva mejorando la dinámica del sistema de potencia [9]. Los generadores de inducción doblemente alimentados sin escobillas también han sido estudiados recientemente y se han reportado buenos resultados [10]. La ventaja que tiene este tipo de generador de inducción con

respecto a los que tienen escobillas es que son libres de mantenimiento. Ambos tipos de generadores usan un convertidor de potencia reducida para el devanado de control, lo que los hace atractivos en sistemas de generación eólica. Sin embargo, la eficiencia de este generador es inferior a la del generador con escobillas, con una diferencia de hasta 7% a bajos niveles de potencia. En el diseño de este tipo de generadores, es práctica común emplear métodos de diseño convencionales, que se han usado desde hace varias décadas, y en los últimos años los diseños se han complementado empleado métodos numéricos para determinar los campos electromagnéticos dentro de los generadores [11]. Wang et. al. [12] diseñaron un generador de manera óptima empleando el método de reconstrucción de los campos magnéticos. Existen diseños de este tipo de generador sin escobillas y de acoplamiento mecánico de manera directa, en donde se emplean dos estatores y rotor en el entrehierro que opera como elemento modulador [13]. Los generadores síncronos de imanes permanentes, puede ser de acoplamiento directo o a través de un sistemas de engranes, y a su vez pueden ser de imanes montados en la superficie del rotor, o bien embebidos en las laminaciones del rotor. Este tipo de máquinas de imanes permanentes tienen la ventaja de tener eficiencias altas y densidad de potencia o de par elevadas, lo que los hace competitivos en muchas aplicaciones industriales. En el diseño de un generador de imanes permanentes, es importante tomar en cuenta varios aspectos, que van desde la temperatura de operación, tipo de devanado, número de polos, evitar la desmagnetización de los imanes, qué tipo de imán es el más apropiado, ya que los imanes pueden ser de ferrita o de neodimio. En los últimos años, el desarrollo de imanes ha permitido tener imanes con la misma cantidad de energía y que operen a temperaturas de operación mayores, como por ejemplo los imanes de Neodimio que puede operarse a 120 °C. Un generador de imanes permanentes de acoplamiento directo a la turbina tiene las ventajas de tener una alta eficiencia, una estructura simple, y una operación confiable, y además las características de baja velocidad, múltiples polos y de tamaño grande. La definición de las dimensiones estructurales permite mejorar el funcionamiento y reducir el costo de la máquina, y esto se logra con la selección del número de polos y del número de ranuras del estator, lo que representa un problema por resolver en los generadores de imanes permanentes acoplados directamente a la turbina [14]. Los generadores de velocidad variable se han usado en turbinas eólicas de gran potencia, debido a que éstos pueden extraer más energía con menos esfuerzos mecánicos y emisiones acústicas [8]. En la actualidad, la utilización de las máquinas de imanes permanentes es elevada debido a las ventajas y su precio. Las máquinas síncronas de imanes permanentes poseen un alto factor de potencia, alta densidad de par y alta eficiencia, razón por la cual se emplean en muchas aplicaciones industriales. Para el ahorro de energía se prefiere utilizar máquinas con un alto factor de potencia y una alta eficiencia [15]. El rotor de una máquina de imanes permanentes está hecho de laminaciones de material ferromagnético y en él están embebidos los imanes, los cuales pueden ser de materiales tales como: de tierras raras, de NdFeB y SmCo, el Alnico (Al, Ni, Co, Fe) y las ferritas cerámicas como la ferrita de Bario $BaOx_6 Fe_2 O_3$ [16, 17]. Se han realizado muchas investigaciones relacionadas con las máquinas de imanes permanentes. Las máquinas de imanes permanentes se clasifican en aquellas que se alimentan con señales senoidales y las que se alimentan con señales trapezoidales. Tradicionalmente, las máquinas trifásicas de imanes permanentes se han empleado como motores y generadores. La disponibilidad de procesadores digitales de señales de alta velocidad y mejores dispositivos electrónicos de potencia ha permitido la investigación en máquinas de imanes permanentes polifásicas [18]. Dentro de la clasificación de las máquinas síncronas de imanes permanentes, se encuentran aquellas con imanes permanentes insertados en el rotor y los que tienen imanes montados en la superficie del rotor. Investigaciones recientes han expuesto, que las máquinas con imanes insertados tienen mayor eficiencia que las que tienen imanes montados en la superficie del rotor [19]. Por otro lado, en el análisis y diseño de máquinas, se han llevado a cabo muchas investigaciones relacionadas con máquinas de doble capa e imanes permanentes interiores, diseño asistido con el método de elementos finitos y considerando pantallas de flujo magnético, máquinas de doble estator, diseños donde se minimiza el rizo del par, experimentos para determinar el comportamiento no lineal de los motores, motores monofásicos de imanes permanentes, y

determinación de parámetros de modelos de los motores de imanes permanentes [20, 21]. También se han realizado investigaciones para el diseño de generadores de imanes permanentes con aplicaciones para parques eólicos, mismas que van desde diseños empíricos, análisis con elementos finitos, hasta diseños empleando métodos globales de optimización [22, 23, 24]. Recientemente las máquinas de imanes permanentes de ranura fraccionaria y devanados concentrados han ganado interés en la comunidad científica debido a las ventajas que tienen estos devanados, entre las que figuran: alta densidad de potencia, alta eficiencia, cabezales cortos, alto factor de relleno en la ranuras, capacidad de debilitamiento de flujo, y tolerancia a las fallas [25]. Los métodos de optimización globales, como los algoritmos genéticos, se han empleado en el diseño de generadores de imanes permanentes para aplicaciones eólicas, los algoritmos genéticos también se han aplicado en otras áreas de la ingeniería eléctrica [26]. Asimismo se han diseñado óptimamente generadores de imanes permanentes polifásicos, en donde el diseño se apoya con el análisis de elementos finitos [27]. En generadores de inducción doblemente alimentados es común encontrar sistemas de transmisión mecánica para aumentar la velocidad del rotor de la turbina hasta la velocidad nominal del generador eléctrico. Se han realizado estudios para determinar la relación óptima del sistema de engranes, ya que esto afecta al costo del convertidor que alimenta al rotor [28]. Sin embargo, los sistemas de transmisión a base de engranes son pesados, y están expuestos al desgaste. Recientemente, la transmisión magnética (engranes magnéticos) en sistemas eólicos se ha propuesto como una alternativa para incrementar la densidad de par en sistemas electromecánicos, ya que evitan los problemas (desgaste, pérdidas y mantenimiento) asociados con la transmisión tradicional a base de engranes [29]. K. Atallah et. al. propusieron un sistema magnético de transmisión variable que potencialmente puede aplicarse a aerogeneradores [30]. También se han propuesto sistemas magnéticos de transmisión continua y variable basados en el análisis espectral de los campos magnéticos y están formados por dos rotores y un estator [31]. Los convertidores trifásicos dobles conectados en arreglo back-to-back se han usado para la conversión de CA/CA con un enlace intermedio de CD que debe ser elevado a un voltaje, de manera que inversor de voltaje pueda operarse en su región lineal. Estos convertidores también se emplean en controladores de potencia bidireccionales y en aplicaciones dominadas por transformadores electrónicos, es decir aplicaciones que no emplean transformadores [9]. Los convertidores completos o back-to-back de voltaje tienen muchas aplicaciones, y también se encuentran en el control de turbinas eólicas como lo menciona Teodorescu [32], en dicho trabajo se desarrollaron los controles para un generador de inducción de jaula de ardilla correspondiente a un aerogenerador de 11 kW, y que puede operar en condiciones aisladas, o estando conectado a la red eléctrica. En dichas pruebas se emuló la turbina con un motor de inducción de 15 kW. Bueno et al [33] proponen un diseño de un convertidor completo con el neutro conectado y de tres niveles para un generador de inducción acoplado a su turbina, la capacidad del inversor fue de 150 kVA. Como en toda planta generadora de energía, es necesario tener un control de la potencia que se entrega a la carga. El control de la potencia generada de una turbina eólica se puede lograr mediante el control del ángulo de ataque en las aspas y mediante el convertidor electrónico. Existen muchos aspectos que se han investigado, entre los que figuran la evaluación del efecto del desbalance de voltaje de la red en el comportamiento de los generadores doblemente alimentados, diseño de generadores eléctricos, diseños de controladores, diseño de turbinas, convertidores electrónicos más amigables con la red eléctrica, entre otras cosas [34]. Al igual que en los sistemas fotovoltaicos, cuando no se dispone de un control de la posición de las aspas, se puede implementar un sistema de seguimiento de la máxima potencia [35]. Las fuentes de energía renovables, en su mayoría se encuentran conectadas a la red eléctrica, y para lograrlo, es necesario que empleen algún método de sincronización. Con el uso de convertidores electrónicos en las fuentes renovables, ha sido necesario el uso de los lazos amarrados de fase (PLL) para lograr la sincronización en fase y frecuencia del voltaje de salida del convertidor con los voltajes de la red eléctrica. Existen PLLs para aplicaciones monofásicas entre los que se encuentran: el modelo convencional, modelo basado en Park, teoría pq, y adaptables, que se han aplicado en fuentes ininterrumpibles, filtros activos, rectificadores pwm, etc [36, 37]. En emuladores

eólicos monofásicos, los PLLs se han empleado con éxito por Ramírez y Arjona [35]. En convertidores trifásicos, los PLLs son de mayor importancia porque permiten la sincronización de los convertidores cuando están presentes condiciones desbalanceadas, que puede suceder en caso de falla; la estrategia es desacoplar las componentes síncronas de secuencia positiva y negativa [38]. Los convertidores actuales deben tener capacidad para cumplir con el código de red, el cual se refiere a la capacidad que debe tener los convertidores para permanecer conectados a la red eléctrica en condiciones de falla, por ejemplo, un cortocircuito en el sistema de potencia. Los primeros aerogeneradores tenían esta deficiencia, ya que cuando se presentaba una falla, el aerogenerador se desconectaba de la red eléctrica. En la actualidad, los convertidores deben estar diseñados para que puedan contribuir a la falla con determinadas características. En los últimos años, el nivel de potencia de los aerogeneradores se ha incrementado llegando a valores de hasta 7 MW y próximamente 10 MW, y los sistemas de generación de energía eólica tienen que ser más confiables y capaces de operar ante fallas extremas en la red eléctrica. Además, se ha vuelto una necesidad que los aerogeneradores estén más activos en el sistema de potencia y contribuyan a la recuperación posterior a fallas en la red, mediante la inyección de corriente reactiva a la red, y como una solución a este crecimiento en la potencia de generadores, se han propuesto convertidores multinivel [39]. También, se han propuesto convertidores back-to-back que sean tolerantes a fallas, como el propuesto por M. Shabazi et. al., que empleando un FPGA parte de una topología de convertidor de 6 ramas y cuando se presenta la falla se vuelve en un convertidor de 5 piernas [40]. En la mayoría de los sistemas eólicos, se requiere un transformador elevador para conectarse a los niveles de tensión de la red del sistema eléctrico de potencia, lo anterior es debido a que emplear un convertidor de alto voltaje es muy costoso. Existe la tendencia a diseñar transformadores de distribución que tengan un menor peso, y que puedan estar instalados en la góndola o barquilla de los aerogeneradores. Hacer esto permitirá reducir las pérdidas de los cables, disminuir el costo de los cables; en el caso de aerogeneradores en el mar y cercanos a la costa, el transformador elevador se encuentra alojado en la góndola y el peso extra del transformador ocasiona que la estructura de la torre deba ser más robusta [3]. En el diseño de un transformador, se consideran sus aspectos térmicos que brindan una oportunidad para reducir el tamaño y lograr un mejor diseño. Adicionalmente, en la actualidad los transformadores de distribución también están siendo sujetos a inspecciones de la presencia de gases disueltos, que son ocasionados por puntos calientes, o bien fallas en el diseño o por la misma operación de éstos. Por otro lado, en los últimos años se ha acentuado la necesidad del ahorro de energía eléctrica en todos los sectores. Las pequeñas y medianas empresas fabricantes de transformadores de distribución tratan de reducir sus costos de fabricación mediante el desarrollo de diseños más eficientes que generen un ahorro de energía. Este ahorro tendrá un impacto positivo en el medio ambiente y en la proyección de los fabricantes nacionales, ya que les permitirá ser más competitivos al ofrecer equipos más eficientes a un menor costo. El desarrollo y empleo de nuevas tecnologías brindan una opción factible para que estas empresas sean capaces de producir diseños más óptimos, los cuales les permitirán competir en los mercados globales [41, 42]. Las especificaciones para el diseño de un transformador están formadas por parámetros básicos tales como potencia, voltajes, factor de potencia, tipos de conexión y reactancia. También se deben considerar restricciones adicionales como pérdidas, elevación de temperatura, volumen, peso, flujos magnéticos de dispersión, ruido acústico, confiabilidad y costo. Además, es necesario seleccionar los materiales (material magnético, material del conductor, clase de aislamiento y materiales dieléctricos) y la geometría (forma del núcleo, proporciones, tamaño) [43, 44]. Los flujos de dispersión que están presentes dentro de los transformadores se generan debido a las corrientes que circulan por los buses de baja tensión, devanados primario y secundario, y que al viajar a través del aire, pueden llegar a incidir en partes metálicas (tanque, herrajes, etc) y dan origen a corrientes de eddy, que a su vez generan pérdidas eléctricas. Las pérdidas por corrientes de eddy están concentradas en pequeñas superficies por lo que pueden causar puntos calientes, que a su vez pueden dar origen a la emisión de gases en transformadores sumergidos en aceite y con la potencialidad de fallas incipientes. Por lo anterior, los fabricantes emplean sistemas de control del

flujo de dispersión, los cuales consisten en emplear pantallas magnéticas, las cuales pueden ser del tipo de material laminado o bien de un material altamente conductor, este último tiene la desventaja de generar pérdidas adicionales debido a las corrientes inducidas [43, 44, 45, 46]. La utilización de transformadores convencionales en granjas eólicas puede ocasionar problemas debido a fallas en los transformadores. Se han reportado fallas en transformadores conectados a generadores de inducción doblemente alimentados y se atribuyen que los transformadores convencionales no están diseñados para soportar los ciclos de generación de energía intermitente debido a la velocidad variable del viento y también debido a la elevada corriente durante el arranque de los generadores [47, 48]. Adicionalmente, se ha reportado que estos transformadores también están expuestos a transitorios debido a las frecuentes conexiones y desconexiones de los mismos, lo que puede ocasionar sobrevoltajes en los devanados y posibles fallas en el aislamiento [49]. S. de Caro, et. al. [50] propusieron una metodología de diseño de transformadores empleados en granjas eólicas y que se basa en la distribución estadística de la energía eólica.

Justificación

El Instituto Tecnológico de la Laguna cuenta con la experiencia para abordar los temas de diseño de generadores, transformadores y convertidores electrónicos como los empleados en sistemas eólicos. El proyecto específico propuesto consiste en el diseño de generadores doblemente alimentados y de imanes permanentes y sus convertidores electrónicos para emplearse en aplicaciones residenciales (hasta 10 kW) y en aplicaciones comerciales (hasta 30 kW) conectados a la red eléctrica, o bien operados en forma aislada. Los clientes residenciales y comerciales representan un campo de desarrollo en nuestro país. Asimismo, se propone analizar el empleo de sistemas magnéticos de transmisión mecánica para emplearse en aerogeneradores. Finalmente, se desarrollará y analizará el comportamiento de transformadores convencionales para determinar mejoras y entender el comportamiento de estos cuando son empleados en granjas eólicas. La aplicación de transformadores de distribución de hasta 7 MW en aerogeneradores y que generalmente son fabricados por empresas pequeñas, representan un mercado atractivo. En el diseño de los dispositivos electromagnéticos se empleará optimización y el método de elementos finitos en dos y tres dimensiones, y una vez que el diseño satisfaga las especificaciones, se procederá a la construcción y pruebas de los prototipos. Las pruebas de los pequeños generadores se efectuarán en el túnel de viento que se tiene en el ITL, mientras que los generadores de mayor potencia se probarán en un sistema de pruebas que se diseñará para este propósito en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, y que estará instrumentado para poder validar diseños de aerogeneradores eléctricos de hasta 30 kW.

Referencias

- [1]. CIINDET, *Integración de Generación Eólica en Sistemas de Energía Eléctrica*, 2010.
- [2]. M. Stiebler, *Wind Energy Systems for Electric Power Generation*. Springer, 2008.
- [3].] B. J. Chalmers and E. Spooner, "An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, pp. 251–257, 1999.
- [4]. J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, X. Wu, and N. Jenkins, "Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 803–809, 2003.
- [5]. Y. Coughlan, P. Smith, A. Mullane, and M. O'Malley, "Wind turbine modelling for power system stability analysis—a system operator perspective," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 929–936, 2007.
- [6]. M. V. Nunes, J. A. P. Lopes, U. H. Bezerra, H. H. Zurn, and R. Almeida, "Influence of the variable speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004.

- [7]. D. J. Trudnowski, A. Gentile, J. M. Khan, and E. M. Petritz, "Fixed-speed wind-generator and wind-park modeling for transient stability studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1911–1917, 2004.
- [8]. C. H. Ng, M. A. Parker, L. Ran, P. J. Tavner, J. R. Bumby, and E. Spooner, "A multilevel modular converter for a large, light weight wind turbine generator," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1062–1074, 2008.
- [9]. M. Simoes and F. Farret, *Renewable Energy Systems - Design and Analysis with Induction Generators*. CRC Press, 2004.
- [10]. Riincos, R. Carlson, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, and H. Voltolini, "Performance and vibration analysis of a 75 kW brushless double-fed induction generator prototype," in *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, vol. 5, 2006, pp. 2395–2402.
- [11]. G. I. Vakil and K. R. Rajagopal, "Computer aided design of a compact doubly-fed induction generator for small wind power application," in *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on*, 2010, pp. 1–4.
- [12]. T. Wei Wang, M. Kiani, and B. Fahimi, "Optimal design of doubly fed induction generators using field reconstruction method," vol. 46, no. 8, pp. 3453–3456, 2010.
- [13]. K. Yunchong Wang, S. L. Ho, W. N. Fu, and J. X. Shen, "A novel brushless doubly fed generator for wind power generation," vol. 48, no. 11, pp. 4172–4175, 2012.
- [14]. Y. Zhang and F. Wang, "Choice of pole-slot number combination for pm generator direct-driven by wind turbine," in *Proc. Joint Int. Conf. Power System Technology and IEEE Power India Conf. POWERCON 2008*, 2008, pp. 1–4.
- [15]. T. Ding, N. Takorabet, F.-M. Sargos, and X. Wang, "Design and analysis of different line-start pm synchronous motors for oil-pump applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1816–1819, 2009. PROYECTOS ESTRATÉGICOS CEMIE-EÓLICO 9
- [16]. S. Ruoho, E. Dllala, and A. Arkkio, "Comparison of demagnetization models for finite-element analysis of permanent-magnet synchronous machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 11, pp. 3964–3968, 2007.
- [17]. A. Wang, H. Li, and C.-T. Liu, "On the material and temperature impacts of interior permanent magnet machine for electric vehicle applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4329–4332, 2008.
- [18]. K. Boughrara, B. L. Chikouche, R. Ibtouen, D. Zarko, and O. Touhami, "Analytical model of slotted airgap surface mounted permanent-magnet synchronous motor with magnet bars magnetized in the shifting direction," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 2, pp. 747–758, 2009.
- [19]. P. M. Lindh, H. K. Jussila, M. Niemela, A. Parviainen, and J. Pyrhonen, "Comparison of concentrated winding permanent magnet motors with embedded and surface-mounted rotor magnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 5, pp. 2085–2089, 2009.
- [20]. L. Fang, B. H. Lee, J. J. Lee, H. J. Kim, and J.-P. Hong, "Study on high-efficiency characteristics of interior permanent magnet synchronous motor with different magnet material," in *Proc. Int. Conf. Electrical Machines and Systems ICEMS 2009*, 2009, pp. 1–4.
- [21]. B. Stumberger, G. Stumberger, M. Hadziselimovic, T. Marcic, P. Virtic, M. Trlep, and V. Gorican, "Design and finite-element analysis of interior permanent magnet synchronous motor with flux barriers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4389–4392, 2008.
- [22]. T. Lindh, P. Salminen, J. Pyrhonen, M. Niemela, J. Kinnunen, and J. Haataja, "Permanent magnet generator designing guidelines," in *Proc. Int. Conf. Power Engineering, Energy and Electrical Drives POWERENG 2007*, 2007, pp. 185–189.
- [23]. J.-C. Hwang, M.-H. Chen, and S.-N. Yeh, "Application of three-level converters to wind power systems with permanent-magnet synchronous generators," in *Proc. 33rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2007*, 2007, pp. 1615–1620.
- [24]. M. A. Khan, L. Dosiek, and P. Pillay, "Design and analysis of a pm wind generator with a soft magnetic composite core," in *Proc. IEEE Int Industrial Electronics Symp*, vol. 3, 2006, pp. 2522–2527.
- [25]. A. M. EL-Refaeie, "Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 1, pp. 107–121, 2010.
- [26]. H. Li, Z. Chen, and H. Polinder, "Optimization of multibrid permanent-magnet wind generator systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 82–92, 2009.
- [27]. S. Brisset, D. Vizireanu, and P. Brochet, "Design and optimization of a nine-phase axial-flux pm synchronous generator with concentrated winding for direct-drive wind turbine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, pp. 707–715, 2008.

- [28]. D. Aguglia, P. Viarouge, R. Wamkeue, and J. Cros, “*Selection of gearbox ratio and power converters ratings for wind turbines equipped with doubly-fed induction generators*,” in Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International, vol. 1, 2007, pp. 447–452. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4270682>
- [29]. Frank and H. A. Toliyat, “Analysis of the concentric planetary magnetic gear with strengthened stator and interior permanent magnet inner rotor,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 4, pp. 1652–1660, 2011.
- [30]. Atallah, J. Wang, S. D. Calverley, and S. Duggan, “Design and operation of a magnetic continuously variable transmission,” in Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, 2011, pp. 312–317.
- [31]. S. Niu, S. L. Ho, and W. N. Fu, “Design of a novel electrical continuously variable transmission system based on harmonic spectra analysis of magnetic field,” vol. 49, no. 5, pp. 2161–2164, 2013.
- [32]. R. Teodorescu and F. Blaabjerg, “Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1323–1332, 2004.
- [33]. E. J. Bueno, S. Cobreces, F. J. Rodriguez, A. Hernandez, and F. Espinosa, “Design of a back-to-back npc converter interface for wind turbines with squirrel-cage induction generator,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 3, pp. 932–945, 2008.
- [34]. D. Santos-Martin, J. L. Rodriguez-Amenedo, and S. Arnalte, “Direct power control applied to doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage conditions,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 2328–2336, 2008. PROYECTOS ESTRATÉGICOS CEMIE-EÓLICO 10
- [35]. F. A. Ramirez, M. A. Arjona, and C. Hernandez, “Emulation of a single phase dspic based gridconnected wind energy conversion system,” in Proc. XIX Int Electrical Machines (ICEM) Conf, 2010, pp. 1–6.
- [36]. S. A. Oliveira da Silva, R. Novochadlo, and R. A. Modesto, “Single-phase pll structure using modified pq theory for utility connected systems,” in Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf. PESC 2008, 2008, pp. 4706–4711.
- [37]. R. M. Santos Filho, P. F. Seixas, P. C. Cortizo, L. A. B. Torres, and A. F. Souza, “Comparison of three single-phase pll algorithms for ups applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 8, pp. 2923–2932, 2008.
- [38]. P. Rodriguez, J. Pou, J. Bergas, J. I. Candela, R. P. Burgos, and D. Boroyevich, “Decoupled double synchronous reference frame pll for power converters control,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 584–592, 2007.
- [39]. Ma, F. Blaabjerg, and M. Liserre, “Thermal analysis of multilevel grid-side converters for 10-MW wind turbines under low-voltage ride through,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 2, pp. 909–921, 2013.
- [40]. M. Shahbazi, P. Poure, S. Saadate, and M. R. Zolghadri, “FPGA-based reconfigurable control for faulttolerant back-to-back converter without redundancy,” vol. 60, no. 8, pp. 3360–3371, 2013.
- [41]. C. Hernandez, M. A. Arjona, and S.-H. Dong, “Object-oriented knowledge-based system for distribution transformer design,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 10, pp. 2332–2337, 2008.
- [42]. C. Hernandez and M. A. Arjona, “Implementation of an object-oriented knowledge-based system for distribution transformer design,” in Proc. 12th Biennial IEEE Conf. Electromagnetic Field Computation, 2006.
- [43]. M. Heathcote, The J&P Transformer Book. Newnes, 1998.
- [44]. A. Reece and T. Preston, Finite Element Methods in Electrical Power Engineering. Oxford University Press, 2000.
- [45]. C. Hernandez, M. A. Arjona, and J. P. Sturgess, “Optimal placement of a wall-tank magnetic shunt in a transformer using fe models and a stochastic-deterministic approach,” in Proc. 12th Biennial IEEE Conf. Electromagnetic Field Computation, 2006.
- [46]. C. Hernandez, J. P. Sturgess, and M. A. Arjona, “Application of particle swarm optimization for positioning a magnetic shunt on the wall tank of a transformer,” in Proceedings of the 16th IEEE Conference on the Computation of Electromagnetic Fields - COMPUMAG 2007, 2007.
- [47]. E. M. Hope, T. A. Bellei, and M. Reyes, “Wind turbine generator step-up transformer failure investigation,” in Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, 2012, pp. 1–7.

- [48]. M. Rioual and J.-C. Reveret, "Energization of step-up transformers for wind-farms: Modeling and its validation by tests performed on a 10 MW site," in Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, 2009, pp. 1–7.
- [49]. Soloot, H. K. Hoidalén, and B. Gustavsen, "The effect of winding design on transformer frequency response with application on offshore wind farm energization," in Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on, 2012, pp. 1–5.
- [50]. S. De Caro, T. Scimone, A. Testa, and A. Yasin, "Optimal size selection for step-up transformers for wind generation plants," in Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on, 2012, pp. 571–576.

7.- Objetivos y metas

Objetivos

- a) Realizar investigación aplicada en el área de aerogeneradores y sus componentes electrónicos/eléctricos/mecánicos asociados.
- b) Publicar los resultados de las investigaciones y generar patentes.
- c) Formación de recursos humanos en los niveles de licenciatura, maestría y doctorado.

Metas

- a) Diseño, análisis, construcción, y pruebas de un prototipo de generador síncrono de imanes permanentes de 0.9 kW, 10 kW, y 30 kW.
- b) Diseño, análisis, construcción y pruebas de un prototipo generador doblemente alimentado de 0.9 kW, 10 kW y 30 kW.
- c) Diseño, y análisis de un sistema magnético de transmisión mecánica para aerogeneradores de 0.9 kW.
- d) Diseño, análisis, construcción y pruebas de un prototipo de un convertidor back-to-back.
- e) Diseñar, construir y probar un generador síncrono de imanes permanentes de 30 kW para uso con caja de transmisión junto con su convertidor back-to-back que será proporcionado al CIATEQ.
- f) Integrar el rotor que será diseñado y fabricado por el CIATEQ al generador síncrono de imanes permanentes de acoplamiento directo de 30 kW que será fabricado por el ITL.
- g) Instalación, y pruebas del aerogenerador de 30 kW del Instituto Tecnológico de La Laguna en el CERTE.
- h) Análisis de los transformadores empleados en plantas eólicas usando el método de elementos finitos.
- i) 4 tesis de doctorado (2 terminadas y 2 al 50% de avance)
- j) 4 tesis de maestría.
- k) 3 tesis de licenciatura.
- l) 8 Publicaciones en revistas indizadas (enviadas y posiblemente aceptadas)
- m) 15 Publicaciones en congresos nacionales e internacionales
- n) 3 Patentes nacionales

8.- Descripción, contenido innovador y propiedad intelectual

Descripción

El proyecto específico consiste en realizar investigación aplicada de vanguardia, es decir, se aplicará el método del elemento finito al diseño de generadores síncronos de imanes permanentes y de generadores de inducción doblemente alimentados, que son dos de los principales generadores empleados en grandes granjas eólicas. En los diseños de los generadores se tomarán en cuenta aspectos electromagnéticos, térmicos y mecánicos, de manera que puedan ser evaluados mediante simulaciones de modelos matemáticos en dos y tres dimensiones, tanto en estado estacionario como transitorio, esto se efectuará antes de que los prototipos se construyan. Los prototipos a construir se harán de las capacidades de 0.9 kW, 10 kW, y 30 kW, el primero porque puede probarse en su totalidad en el túnel del ITL, y los otros porque corresponden a la cantidad de potencia instalada que está permitida para productores independientes del tipo residencial y comercial, respectivamente. Adicionalmente, se colaborará con el CIATEQ mediante el intercambio de componentes; el CIATEQ proporcionará un rotor y sus controles con capacidad de 30 kW, y el ITL proporcionará un generador síncrono de imanes permanentes (para uso con caja de transmisión) y su convertidor electrónico back-to-back de 30 kW. En esta propuesta de proyecto, también se van a estudiar los sistemas magnéticos que pueden emplearse en lugar de los sistemas mecánicos de transmisión que se emplean entre las turbinas eólicas y el generador eléctrico. Por otro lado, los transformadores que se emplean para conectar los generadores de las granjas eólicas con el sistema eléctrico de potencia están expuestos a condiciones de carga diferentes a las de un transformador para una aplicación convencional, y la generación de transitorios y armónicos por los convertidores electrónicos hacen que los transformadores deban tomar en cuenta aspectos especiales en su diseño. En este proyecto se plantea la evaluación del diseño de transformadores para aplicaciones especiales, y determinar las mejoras que se podrían hacer para que los fabricantes de transformadores mexicanos, como la empresa Ingeniería y Manufacturas Eléctricas SA de CV, puedan suministrar al mercado nacional productos de mejor calidad. En el proyecto, también se van a diseñar los convertidores electrónicos que se emplean para acondicionar la energía generada por las máquinas eléctricas y entregarla a los usuarios. Finalmente, se formarán recursos humanos para que puedan incorporarse a centros de investigación o empresas, que ayudarán a detonar el área de la energía eólica en nuestro país.

Contenido innovador

El proyecto contiene varias innovaciones, en materia de generadores eléctricos, la innovación radica que se diseñarán empleando herramientas de vanguardia que permitirán abatir costos de fabricación excesiva de prototipos, llevar un producto al mercado con mayor rapidez y donde se pueden optimizar costos de materiales. Esta metodología innovadora se aplicará al diseño de los generadores de la granja eólica. También existe la posible innovación de emplear sistemas de transmisión magnética en lugar de los convencionales del tipo mecánico, que tiene mayor eficiencia, no tienen desgaste y que sean controlables. Las mejoras que se pueden detectar en el diseño de transformadores de granjas eólicas pueden representar otra innovación, ya que es tema novedoso en materia de investigación. Finalmente, el desarrollo de nuestro laboratorio de convertidores completos para energías renovables representa otra innovación.

Propiedad intelectual

Las investigaciones que se realizarán permitirán obtener al menos tres patentes nacionales, mismas que se tramitarán ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual para proteger los desarrollos tecnológicos realizados.

9.- Resultados esperados y entregables

Resultados esperados

- a) Un prototipo de un generador síncrono de imanes permanentes de 0.9 kW, 10 kW y 30 kW.
- b) Un prototipo de un generador de inducción doblemente alimentado de 0.9 kW, 10 kW, y 30 kW.
- c) Un modelo matemático que permita demostrar la factibilidad de emplear sistemas magnéticos para transmisión mecánica entre la turbina eólica y el generador.
- d) Metodología de mejoras a diseños existentes de transformadores para que puedan emplearse con mayor confiabilidad en granjas eólicas.
- e) Un prototipo de convertidor back-to-back para generadores síncronos de imanes permanentes y de inducción doblemente alimentados. PROYECTOS ESTRATÉGICOS CEMIE-EÓLICO 13
- f) Diseñar, construir y probar un generador síncrono de imanes permanentes de 30 kW para uso con caja de transmisión junto con su convertidor back-to-back que será proporcionado al CIATEQ.
- g) Integrar el rotor que será diseñado y fabricado por el CIATEQ al generador síncrono de imanes permanentes de acoplamiento directo de 30 kW que será fabricado por el ITL.
- h) Instalación, y pruebas del aerogenerador de 30 kW del Instituto Tecnológico de La Laguna en el CERTE.
- i) Titular 4 doctores en ciencias, 4 maestros en ciencias y 3 ingenieros mediante el desarrollo de tesis.
- j) Publicar los resultados en artículos de revistas indizadas (8), artículos en congresos internacionales y nacionales (15) y en patentes nacionales (3).

Entregables

Etapa	Entregables
1	- Búsqueda y revisión bibliográfica relacionada con: a) el diseño de generadores de imanes permanentes, b) generadores de inducción doblemente alimentados, c) sistema magnético de transmisión mecánica, d) convertidores back-to-back para aerogenerador. - Preparar un documento en donde se establezcan indicadores cuantificables del proyecto
2	- Adquisición de software y equipo (I) - Desarrollo de la metodología de diseño de un generador de imanes permanentes de acoplamiento directo. -Desarrollo de la metodología de diseño de un generador de imanes permanentes acoplamiento con caja de transmisión (para CIATEQ). - Desarrollo de la metodología de análisis y diseño de un sistema magnético de transmisión mecánica. - Desarrollo de la metodología de diseño de un generador de inducción doblemente alimentado. - Análisis de los problemas de diseño que debe cubrir un transformador para aerogeneradores. - Diseño de un convertidor back-to-back-aplicado a generadores de imanes permanentes y de generadores de inducción doblemente alimentados. - Adquisición de acero magnético (Curva BH) necesario para el diseño de los prototipos de aerogeneradores. - Visitas de trabajo a instituciones miembros del CEMIE-Eólico
3	- Adquisición de equipo

	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño de un sistema magnético de transmisión mecánica - Diseño de generador de imanes permanentes de acoplamiento directo de potencia de 0.9 kW, 10 kW y 30 kW. - Diseño de generador de imanes permanente - Diseño de generador de inducción doblemente alimentado de potencias de 0.9 kW, 10 kW, y 30 kW. - Recopilación y preparación de la información de diseño de los transformadores empleados en grandes transformadores. - Simulación del convertidor back-to-back para operación aislada e interconectada a la red. - Especificación y diseño de la torre, góndola y accesorios del aerogenerador de 30 kW - Asistencia a congreso nacional
Etapa	Entregables
4	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño y construcción del banco de pruebas para los generadores de 10 kW y hasta 30 kW y el desarrollo de un sistema de adquisición (usando Labview) de variables de velocidad, corrientes, potencias, temperaturas, y par mecánico. - Caracterización de material magnético e imanes permanentes. - Evaluación del diseño del generador de imanes permanentes de acoplamiento directo mediante simulaciones con elementos finitos en 2D y 3D, considerando aspectos electromagnéticos, térmicos y mecánicos. - Evaluación del diseño del generador de imanes permanentes con caja de transmisión mediante simulaciones con elementos finitos en 2D y 3D, considerando aspectos electromagnéticos, térmicos y mecánicos. - Evaluación del diseño del generador doblemente alimentado con simulaciones con elementos finitos en 2D y 3D, considerando aspectos electromagnéticos, térmicos y mecánicos. - Desarrollo de la metodología de análisis y diseño de un sistema magnético de transmisión mecánica. - Desarrollo de los modelos en parámetros concentrados y simulación de aerogeneradores y convertidores usando Matlab/Simulink/ SimPowerSystems. Los resultados serán empleados para evaluar el desempeño de transformadores empleados en granjas eólicas. - Maquinado, fabricación y pruebas preliminares de prototipos de generadores de 0.9 kW. - Evaluación del diseño y análisis de la torre, góndola y accesorios del aerogenerador de 30 kW. - Diseño, construcción y pruebas de tarjetas de disparo de los IGBTs de los convertidores electrónicos. - Presentación de avance a Equipo Técnico y Grupo Directivo
5	<ul style="list-style-type: none"> -Adquisición de materiales y equipo. -Diseño y construcción del banco de pruebas para los generadores de 10 kW y hasta 30 kW y el desarrollo de un sistema de adquisición (usando Labview) de variables de velocidad, corrientes, potencias, temperaturas, par mecánico. - Fabricación del generador de imanes permanentes de acoplamiento directo. - Fabricación del generador de imanes permanentes para uso con caja de transmisión. - Diseño y análisis de la torre, góndola y accesorios para aerogeneradores - Fabricación del generador de inducción doblemente alimentado - Evaluación electromagnética del sistema magnético de transmisión mecánica usando simulaciones con elementos finitos en 2D y 3D. - Evaluación de los transformadores empleando simulaciones de elementos finitos en 2D.

	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño, desarrollo y pruebas de la etapa de potencia de los convertidores electrónicos empleado DSPs y FPGAs. - Presentación de resultados en congresos internacionales - Presentación de avance a Equipo Técnico y Grupo Directivo
6	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño y construcción del banco de pruebas para los generadores de 10 kW y hasta 30 kW y el desarrollo de un sistema de adquisición (usando Labview) de variables de velocidad, corrientes, potencias, temperaturas, par mecánico y pruebas generadores. - Evaluación de los transformadores empleando simulaciones de elementos finitos en 3D. - Diseño de la etapa de control de la generación de potencia de los
Etapa	Entregables
6	<ul style="list-style-type: none"> convertidores backto-back, considerando aspectos de código de red, fallas asimétricas, tolerancia a fallas y control de aspas. - Fabricación de torre y góndola para generador de 30 kW. - Fabricación de prototipo de engrane magnético. - Asistencia a congresos internacionales y nacionales
7	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación de los transformadores empleando simulaciones de elementos finitos en 3D. - Pruebas en laboratorio del generador de imanes permanentes de acoplamiento directo y su controlador. - Pruebas en laboratorio del prototipo del generador de imanes permanentes (CIATEQ) y su controlador. - Pruebas en laboratorio del prototipo del generador de inducción doblemente alimentado y su controlador. - Evaluación de las mejoras sugeridas a los diseños de transformadores de aerogeneradores. Se emplearan simulaciones con elementos finitos. - Pruebas de prototipos de engranes magnéticos en túnel de viento. - Pruebas fuera de línea de los convertidores back-to-back empleando generadores de inducción y doblemente alimentados que se tienen en el laboratorio de máquinas eléctricas del ITL. - Presentación resultados en congresos nacionales e internacionales. - Acondicionamiento de cimentación, obra civil e instalación de aerogeneradores en el CERTE y su transporte a Oaxaca.
Etapa	Entregables
8	<ul style="list-style-type: none"> -Pruebas a prototipos de engranes magnéticos en túnel de viento -Pruebas funcionales de los prototipos de generadores de imanes permanentes acoplamiento directo de 0.9 y 10 kW y su controlador en laboratorio. - Pruebas funcionales de los prototipos de generadores de inducción doblemente alimentados y su control en laboratorio. - Transferencia de metodología de diseño de transformadores a fabricante de transformadores. - Instalación y montaje de prototipo de aerogenerador de acoplamiento directo 30 kW en campo (CERTE). - Pruebas de funcionalidad en campo del control de aspas del generador de 30 kW (CERTE) - Pruebas de protecciones del aerogenerador de 30 kW (CERTE) - Pruebas del control del convertidor electrónico del generador de acoplamiento directo de 30 kW (CERTE) - Pruebas finales del aerogenerador de acoplamiento directo de 30 kW (CERTE)

	Publicaciones sometidas a revistas indizadas. Solicitudes de 3 patentes nacionales. Reporte final del proyecto. Actas de titulación de los estudiantes que participaron en el proyecto con el desarrollo de tesis.
--	---

10.- Metodología propuesta

La metodología a seguir en el proyecto consiste en una serie de actividades que van desde la búsqueda y revisión detallada de literatura hasta llegar a la construcción y evaluación experimental de los prototipos, así como la instalación de un aerogenerador completo en el CERTE. El diseño de los generadores eléctricos se basará principalmente en el uso de herramientas de vanguardia como lo es el método numérico de los elementos finitos, una vez que los modelos matemáticos de los generadores satisfagan las especificaciones de diseño, se procederá con la construcción de los prototipos.

En la **primera etapa** se llevará a cabo la adquisición de material científico, como publicaciones y patentes en las principales bases de datos de publicaciones científicas a las cuales se tiene acceso en el ITL. En la **etapa 2**, se procederá con la adquisición del software científico tal como el ANSYS, PSIM, Matlab, etc. que se empleará durante todo el proyecto. También se iniciará con la adquisición del equipo para el desarrollo de banco de pruebas de generadores a diseñar y diverso equipo de laboratorio (osciloscopios, anemómetro, y equipo de cómputo). Asimismo, se iniciará con el desarrollo de la metodología para el diseño de los generadores de inducción doblemente alimentados, de los de imanes permanentes, convertidores back-to-back, del sistema magnético para la transmisión mecánica y de los transformadores empleados en granjas eólicas. En esta etapa también se desarrollará la metodología de diseño de un generador síncrono de imanes permanentes para emplearse con caja de velocidad, y junto con su convertidor back to back será proporcionado al CIATEQ.

En la **etapa 3**, se continuará con la adquisición e instalación del equipo solicitado para el desarrollo de este proyecto. Asimismo, se llevará cabo el diseño de los generadores usando circuitos equivalentes o circuitos magnéticos, apoyándose con la herramienta numérica del método de elementos finitos. Los diseños preliminares serán para los generadores de inducción doblemente alimentados, para el generador de imanes permanentes en las potencias de 0.9 kW, 10 kW, y 30 kW. El generador de 0.9 kW se podrá probar en el túnel de viento que se tiene en el ITL, y es de esa potencia porque se cuenta con una turbina eólica de tres aspas capaz de proporcionar una potencia de 0.9 kW a una velocidad del viento de 12 m/s. Los generadores de 10 kW y 30 kW están pensados para cubrir los límites que se tienen en nuestro país para productores de energía independientes del tipo residencial y comercial, respectivamente. Se tendrán reuniones con personal de la compañía IMESA SA de CV para recopilar y preparar la información de diseño de los transformadores a analizar y evaluar numéricamente su comportamiento cuando se emplean en granjas eólicas. También se evaluará mediante simulaciones el convertidor back-to-back cuando se opera en condiciones aisladas y conectado a la red, se empleará el algoritmo de modulación de espacios vectoriales y la sincronización a la red se hará mediante un lazo amarrado de fase (PLL), se presentarán los resultados obtenidos en congresos nacionales e internacionales y se documentarán los resultados. En la etapa 3 se iniciará el acondicionamiento del banco de pruebas y se adquirirá el equipo Brookhaus para caracterizar los materiales magnéticos.

En la **etapa 4**, se continuará con la construcción del banco de pruebas para los generadores de 10kW y 30 kW. Asimismo se evaluarán los diseños de los generadores empleando simulaciones de elementos finitos en dos dimensiones, donde se evaluarán aspectos electromagnéticos, térmicos, y mecánicos de los generadores. Se simulará un aerogenerador con su convertidor conectado empleado el software de simulación de sistemas de potencia SimPowerSystems de Matlab. Los resultados obtenidos se emplearán para evaluar el comportamiento dinámico de los transformadores en las granjas eólicas. Finalmente, se diseñarán los drivers de los IGBTs a emplear en los convertidores back-to-back y se llevará cabo la documentación de esta etapa.

En la **etapa 5**, se continuará con la actividad de la construcción del banco de pruebas para los generadores a diseñar. Los diseños de los generadores se evaluarán para ver si cumplen con la especificación de diseño mediante simulaciones de elementos finitos en 3D. También se evaluará el comportamiento electromagnético del sistema magnético para transmisión mecánica en aerogeneradores con simulaciones de elementos finitos en el dominio del tiempo. En cuanto a los transformadores, se harán simulaciones de elementos finitos para evaluar su comportamiento ante disturbios en un granja eólica, se simularán los ciclos de carga para evaluar su comportamiento térmico y esfuerzos mecánicos. Se diseñará, construirá y probará la topología de IGBTs del convertidor back-to-back empleando DSPs y FPGAs. Finalmente, se presentarán los resultados en congresos nacionales, e internacionales y se elaborará la documentación de la esta etapa.

En la **etapa 6**, En esta etapa también se evaluarán los transformadores empleando simulaciones con el método de elementos finitos en 3D. Se diseñará y simulará la etapa de control del convertidor back-to-back considerando aspectos de código de red, fallas asimétricas y tolerancia a fallas. Finalmente se hará la documentación respectiva de esta etapa. Se harán pruebas en laboratorio.

En la **etapa 7**, se construirán y probarán los prototipos de los generadores de inducción doblemente alimentados y de imanes permanentes; en su proceso de construcción se cortarán las laminaciones empleando la máquina láser que se tiene en el ITL y que adquirió para esta finalidad. Se evaluarán los resultados de las simulaciones de los transformadores de aerogeneradores y se determinarán las mejoras a los diseños existentes en la empresa IMESA SA de CV. También se probarán los convertidores back-to-back en generadores existentes en el laboratorio de máquinas eléctricas del ITL. Se presentarán los resultados en congresos nacionales e internacionales y se documentará las actividades de esta etapa.

En la **etapa 8**, Se integrará el rotor que proporcionará el CIATEQ al generador de acoplamiento directo y se harán las pruebas de funcionalidad a los prototipos construidos de inducción doblemente alimentados y posteriormente se probarán con el convertidor back-to-back integrado a los generadores. Cada generador tendrá su propio convertidor back-to-back debido a que las máquinas son de capacidades diferentes. Se hará la transferencia a la compañía IMESA SA de CV de la metodología a seguir en el diseño de transformadores a emplearse en granjas eólicas. Finalmente, se escribirán los artículos para someterse a revistas indizadas, y se elaborará el reporte final de cierre del proyecto.