



**Universidad Tecnológica Nacional**  
**Rectorado**  
**Secretaría de Ciencia, Tecnología y**  
**Posgrado**

**SISTEMA DE INFORMACION DE CIENCIA Y**  
**TECNOLOGIA (SICyT)**

**FORMULARIO PARA PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

**Código del Proyecto: ENUTNHA0006622**

1. Unidad Científico-Tecnológica

- FR Haedo - Departamento Electrónica (UTN- FRH)
- FR Haedo - GRUPO GESE
- FR Haedo - LABORATORIO DE AERODINÁMICA Y FLUIDOS

## 2. Denominación del PID

Estudio de mejora en la producción energética y vida útil de generadores eólicos de baja potencia

## 3. Resumen Técnico del PID

La idea de este trabajo surge de la necesidad de seguir incrementando capacidades en el área energética, clave en el desarrollo de un país o región, y con el menor daño al medio ambiente (libre de polución) y en forma sustentable. Las energías renovables y dentro de estas la eólica de baja potencia cumple con el propósito del párrafo anterior. Por otra parte gracias a la reglamentación de la ley nacional de generación distribuida 27.424, se suma a la generación aislada la posibilidad de una variedad de escenarios de intercambio con la red eléctrica, priorizando el auto consumo dado en principal por los continuos aumentos de tarifas y la posibilidad de entregar los excedentes de generación y obtener un beneficio por ello. Otro aspecto no menor en el futuro cambio del escenario electroproductor, el cual tiende a una generación distribuida, con los sistemas híbridos (convencional + renovable). Todo lo dicho es ratificado por prestigiosos laboratorios internacionales como el NREL (Laboratorio de Energías Renovables de los Estados Unidos), o la RISO de Dinamarca por nombrar algunos de los más destacados, que han demostrado la valorización de una nueva manera de generar la energía en el propio lugar donde se consume, lo cual según diferentes indicadores, da un mejor desempeño del sistema frente a la actual proveniente de grandes centros de generación. Para lo anterior nuestro país cuenta con sitios, respecto de otros, con capacidad de recurso eólico según mediciones con excelentes valores medios de densidad de potencia por m<sup>2</sup> o clase de viento. Esto es destacable en gran parte de nuestro territorio, en particular casi toda la Patagonia, el sur de la provincia de Bs. As, entre los principales. Más allá de lo marcado en párrafos anteriores, las características particulares de las condiciones atmosféricas de los sitios con "buenos vientos", condiciones de alto nivel de turbulencia y ráfagas, crea la necesidad de mejorar desempeños y estudiar diferentes métodos de trabajo de las turbinas eólicas, en este caso de baja potencia (menores a los 50 kW), para lograr una mejor producción, con costos aceptables y aumento de la vida útil. Por ello, en este trabajo, se propone lo siguiente: Estudiar en forma analítica y a través de programas informáticos de modelado y simulación, la implementación de un sistema de control de paso de pala, para aerogenerador de eje horizontal de baja potencia, que permita un arranque a bajas velocidades de viento, con la posibilidad de aumento en la producción energética. Modelar el sistema mecánico de un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia y fabricar su prototipo experimental. Diseñar un nuevo perfil alar para mejorar desempeño en la obtención de energía y mitigación de cargas dinámicas. Estudiar la factibilidad de nuevo método de construcción de palas por impresión 3D. Ensayar en túnel de viento y con posibilidad de poder hacer en campo. Analizar resultados y evaluar las posibles mejoras.

## 4. Programa

Energía

## 5. Proyecto

Tipo de Proyecto: UTN (PID UTN) SIN INCORPORACION EN PROGRAMA INCENTIVOS

Tipo de Actividad: Investigación Aplicada

## Campos de Aplicación:

Rubro	Descrip. Actividad	Otra (especificada)
ENERGIA (Producción)	Eólica	

## Disciplinas Científicas:

Rubro	Disciplina Científica	Otras Disciplinas Científicas
INGENIERIA AERONÁUTICA	Aerodinámica	Aeroelasticidad
INGENIERIA ELÉCTRICA	Sistemas eléctricos de potencia	-
INGENIERÍA MECÁNICA	Diseño	-

#### Palabras Clave

Eólica, Medición, Control, Potencia

#### 6. Fechas de realización

Inicio	Fin	Duración	Fecha de Homologación
01/01/2020	31/12/2021	24 meses	-

#### 7. Aprobación/ Acreditación / Homologación / Reconocimiento (para ser completado por la SCTyP - Rectorado)

**7.1 Aprobación / Acreditación / Reconocimiento (para ser completado por la FR cuando se posea N° Resolución)**  
 N° de Resolución de aprobación de la FR: 196/19

**7.2 Homologación (para ser completado por la SCTyP - Rectorado)**

Código SCTyP: ENUTNHA0006622

Disposición SCTyP:

Código Ministerio:

#### 8. Estado (para ser completado por la SCTyP - Rectorado)

EN TRÁMITE

#### 9. Aavales (presentación obligatoria de aavales)

C.V. de: Raúl Versaci, Bufanio Ruben, Alejandro de Villafior, Ramiro Bracco, Javier Rubido, Mariano Flores, Carlos Stortoni. Res. de CD N° 196/19. Res. de Decano Ad Referendum del CD N° 598/19 Aval del Sistema SICyT

#### 10. Personal Científico Tecnológico que participa en el PID

Apellido y Nombre	Cargo	Hs/Sem	Fecha Alta	Fecha Baja	Otros Cargos
VERSACI, RAUL ANTONIO	DIRECTOR	10	01/01/2020	31/12/2021	
BUFANIO, RUBÉN DOMINGO	INVESTIGADOR FORMADO	10	01/01/2020	31/12/2021	
DE VILLAFIOR, ALEJANDRO	CO-DIRECTOR	20	01/01/2020	31/12/2021	
RUBIDO, JAVIER ALEJANDRO	INVESTIGADOR DE APOYO	10	01/01/2020	31/12/2021	-
STORTONI, CARLOS DAMIAN	INVESTIGADOR ESTUDIANTE	10	01/01/2020	31/12/2021	-
FLORES, MARIANO GASTÓN	INVESTIGADOR DE APOYO	10	01/01/2020	31/12/2021	-

#### 11. Datos de la investigación

##### Estado actual de concimiento del tema

El conocimiento sobre el tema radica en lo obtenido a través de la búsqueda bibliográfica y lo desarrollado al momento por medio del trabajo de investigación PID UTN1899, finalizado en diciembre del 2015 y entregado su trabajo final en agosto del 2016 con evaluación satisfactoria. Este trabajo dio comienzo en el 2012 al desarrollo de conocimientos sobre la energía eólica en la UTN Facultad Regional Haedo, proponiendo diferentes métodos de control de potencia para altos vientos con la idea de que sean sencillos, robustos, y de bajo mantenimiento. La evaluación de resultados en túnel de viento, del prototipo experimental, llevo no solo a ratificar análisis teóricos previos, sino a entender que se debía seguir investigando sobre mejoras y su factibilidad con otras herramientas de desarrollo tanto experimentales como de modelado y simulación.

Dado lo anterior y viendo la necesidad de mas investigación es que se formula el PID UTN4726 (Disposición SCTyP 337/2017), de título: Estudio de Control de Potencia por Paso de Pala para Generador Eólico de Baja Potencia, el cual tiene fecha de culminación el 31/12/2019 y del que se ha obtenido una propuesta experimental que dado los buenos desempeños esta actualmente en vías de ser patentada. Más allá del conocimiento logrado en este último, y las presentaciones en diversos congresos, el equipo de trabajo entiende la necesidad de continuar investigando mejoras de desempeño y es por ello el planteamiento a través de esta propuesta.

Por otra parte es fundamental seguir con el análisis del acervo bibliográfico el cual se describe a continuación:

3.2.1) Orientado a comprender la conversión de la energía eólica y su control:

Para poder abordar el problema que se plantea, previamente es necesario comprender de manera pormenorizada los sistemas de conversión de energía eólica o WECS (Wind Energy Conversion Systems).

Es por ello que la bibliografía [1], [2] y [3] son fundamentales en tal sentido y permiten a los nuevos integrantes que se suman a este proyecto conocer los aspectos generales de la temática energética que se está estudiando. Luego los trabajos [4], [5], [6] y [7] desarrollan las diferentes posibilidades de control que se pueden aplicar en forma general a las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT)

3.2.2) Orientada a comprender los métodos actuales de control de potencia en generadores eólicos de baja potencia.

Más allá de conocer el recurso eólico de un sitio, el carácter variable y estocástico del mismo hace que sea difícil y complejo el control de potencia en aerogeneradores "pequeños" o por debajo, como indica la norma IEC61400-2, [8], (requerimientos de diseños para aerogeneradores de baja potencia), de los 200m<sup>2</sup> de área de barrido de su rotor, alrededor de unos 50kW máximos. Encontrar un buen balance entre este factor muy vinculado a la seguridad de desempeño, mantenimiento y vida útil, con producción de energía adecuada y en calidad acorde a las normas (IEC-61400-21), dentro de costos aceptables en comparativa con otras fuentes de generación, suele ser complicado de equilibrar y lograr.

Por lo tanto es de mucha utilidad la bibliografía [9], que estudia la generación eólica en baja potencia en sus aspectos principales, brindando hasta el capítulo 6 los índices fundamentales que hacen a su desempeño, luego en el capítulo N° 7 el diseño de las palas en baja potencia y en los que siguen hasta el n° 10 todo lo relacionado al control de velocidad/potencia y evaluación de cargas. Luego también es de mucho aporte la [10], respecto a los requerimientos de diseño, documentación y certificación para con un generador eólico de baja potencia.

Para poder incursionar en el control de potencia es necesario comprender los mecanismos que lo posibilitan y las herramientas que permiten su evaluación. Para ello se encuentra contribución en el trabajo [11] que estudia el desempeño del flujo de aire sobre la pala de un rotor de aerogenerador de baja potencia, y el [12] que analiza el caso de ángulos de ataques grandes. Luego para el análisis de desempeño de los rotores de los aerogeneradores, el escrito [13] entrega una posibilidad de mejora dentro de la teoría de BEM (Blade Element Momentum) muy utilizada en tal sentido. Por otro lado la [14] muestra las evaluaciones por medio de tunel de viento, sistema muy útil, como elemento de validación de los modelos matemáticos utilizados en los diseños de control.

Por último se estudian, para tener como elemento de comparación, tratados que aplican diversas técnicas de controles de paso de pala, como por ejemplo electromecánicos en [15], que se basan en accionamientos hidráulicos conducidos por servomotores, o en [16], donde se estudian controles de paso de pala por medio de diferentes tipos de realimentaciones como las feedforward. Luego en la [17] se investiga regular potencia por medio de dos acciones conjuntas, una aerodinámica por paso de pala electromecánico y otra eléctrica por cambio del consumo de potencia, de manera de minimizar cargas y evitar sobre velocidades de rotación; ya que el análisis aplica a sitios con alto nivel de turbulencia en donde el control por solo furling, suele ser según se indica, no lo más adecuado.

3.2.3) Orientada a investigar los métodos actuales de control de potencia por sistemas mecánicos accionados por fuerza centrífuga.

Como se indicó en el apartado anterior, es muy importante balancear buen desempeño del control de potencia con costos adecuados, es por ello se hace una investigación bibliográfica y de mercado del control de potencia que se quiere proponer. Por tal motivo en [18] se encuentra un interesante estudio de dos métodos de control por acción de fuerza centrífuga, donde se indica favorecen, por dicha acción, el cumplimiento de las recomendaciones de la norma IEC 61400-2, respecto al control de velocidad y seguridad en caso de pérdida de la carga o red eléctrica.

Luego en [19] se encuentra un interesante estudio en principio teórico y luego experimental del control centrífugo de velocidad de giro en turbinas eólicas de baja potencia, analizando el efecto del cambio de velocidades del viento en el ángulo de rotación de las palas y dando una interesante base de diseño de los sistemas de control centrífugo.

Por otro lado se siguen encontrando publicaciones, que aunque de exposición comercial, indican que se continúa trabajando y desarrollando con éxito en la industria métodos de control centrífugo. Es el caso de la firma A&C Green Energy, la Enair Energy S.L. (con sus equipos ENAIR 30 y 70) y la Sonkyo Energy con sus Windspot, por nombrar algunas, que han patentado como esta última el sistema de control pasivo de potencia por acción de centrífugos.

3.2.4) Orientada a comprender los métodos de diseño y evaluación de palas de aerogeneradores de baja potencia

Ya que se observa de trabajo anterior se debe seguir mejorando en el diseño de las palas del rotor y estudio de los materiales a emplear, la [20] y [21] muestran avances en el desarrollo de las palas del rotor que favorecen a desempeños energéticos y amortiguamiento de cargas. Por otro lado la [22] muestra el avance y comparación de desempeño a través del uso diferentes materiales compuestos con madera. Por último la [23] entrega detalles muy interesantes del diseño y testeo de palas a través de la impresión 3D, lo

cual es un aporte de conocimiento para este trabajo donde no solo se quiere seguir optimizando los perfiles a utilizar, sino también indagar en mejoras del proceso, con estudio de tiempos y materiales de construcción.

Más allá de todo esto, dado las dificultades encontradas en las investigaciones, es necesario seguir trabajando en el desarrollo, análisis de desempeño y comparación de diferentes palas para rotores y métodos de control de potencia, en principal los de paso fijo por control de sobre velocidad por stall y acción de furling respecto de los de paso variable pasivos, aunque en principio más complejos que los primeros, según este estudio quiere continuar investigando, más adecuados a las condiciones de vientos de nuestro país.

#### Referencias:

- [1] Burton, Wind Energy Handbook, Wiley, 2011
- [2] Brendan Fox, Wind Power Integration, Institution of Engineering and Technology, London, 2014
- [3] J.Laks, L. Pao, A. Wright, Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future, University of Colorado, 2009.
- [4] F. Bianchi, Wind Turbine Control Systems, Springer, 2007
- [5] I. Munteanu, Optimal Control of Wind Power Systems, Springer, 2008
- [6] P.Moriarty, Wind Turbine Modeling Overview for Control Engineers, June 2009
- [7] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, Wind Energy Generation, Modeling and Control, Wiley, 2009.
- [8] IEC-61400-2-2006,
- [9] David Wood, Small Wind Turbines, Analysis, Design, and application, Springer, 2011.
- [10] Sven W. Enevoldsen, Small Wind Turbines Engineering, Randers Denmark, 2015.
- [11] Haseeb Shah, Sathyajith Mathew, Chee Ming Lim, Numerical simulation of flow over an airfoil for small wind, Springerlink.com, 2015.  
turbines using the c<sub>r</sub> - Reh model
- [12] Bryan Nelson Jen-Shiang Kouh, The numerical analysis of wind turbine airfoils at high angles of attack, Springerlink.com, 2015.
- [13] Su Liu and Isam Janajreh, Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines, SpringerOpen Journal, 2012.
- [14] R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina, Numerical and experimental analysis of micro HAWTs designed for wind tunnel applications, SpringerOpen Journal, 2016.
- [15] Ching-Sung Wang and Mao-Hsiung Chiang, A Novel Pitch Control System of a Large Wind Turbine Using Two-Degree-of-Freedom Motion Control with Feedback Linearization Control. Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd., Taipei 106, Taiwan, Septiembre 2016.
- [16] Fiona Dune, Lucy Pao, Adding Feedforward Blade Pitch Controllers, Mar. 2011
- [17] Nagai, Baku M.; Ameku, Kazumasa; Roy, Jitendro Nath, Performance of a 3kW Wind Turbine Generator With Variable Pitch Control, Feb. 2009.
- [18] Dipl.-Ing. Eckhard Gauterin, M.Sc. Niels Harborth stipendiary of Reiner Lemoine Stiftung, Centrifugal Pitch Systems for Small Wind Turbines, Delft University of Technology – 27th and 28th October 2011 – Delft, The Netherlands.
- [19] Zhu, G.; Chen, G.; Li, L.; Dai, L.; Analysis and study on centrifugal rotating speed control of small wind turbine blade; International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, ICEESD 2011; Shanghai; China; 21 October 2011 through 23 October 2011; Code 87168
- [20] Matias Sessarego and David Wood, Multi-dimensional optimization of small wind turbine blades, SpringerOpen Journal, 2015.
- [21] Povl Brøndsted, Hans Lilholt, and Aage Lystrup, Compositematerials Forwind Power Turbine Blades, Materials Research Department, Risoe National Laboratory, DK 4000 Roskilde, 2005.

[22] Santosh P. Masal, Sham H. Mankar, Sandip A. Kale, Weight and Cost Reduction of A Small Wind Turbine Blade, .Mechanical Engineering Department Trinity College of Engineering and Research, Pune, India, 2017.

[23] Sean Poole, Russell Phillips, Rapid Prototyping of Small Wind Turbine Blades Using Additive Manufacturing, Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics International Conference (PRASA-RobMech) Port Elizabeth, South Africa, 2015.

#### 3.2.4.) Hipótesis:

Se puede incrementar la vida útil y producción de energía en los aerogeneradores de baja potencia a través de mejoras en el diseño de sus palas, y con propuestas superadoras de controles pasivos de potencia para vientos fuertes y turbulentos, sin incurrir en costos excesivos, y disminuyendo tiempos de construcción frente a los tradicionales.

#### 3.2.5) Justificación:

La regulación de potencia y mitigación de cargas aerodinámicas por encima de viento nominal es un problema necesario de resolver en la generación eólica de baja potencia. Los controles tradicionales tanto el por pérdida o stall como el de protección por furling se consiguen a través de condiciones de inestabilidad y separación del flujo sobre las palas, lo cual lleva a la generación de histeresis dinámicas que disminuyen la vida útil de un aerogenerador ya que provocan importantes fluctuaciones y fatigas de material, [23].

Por otra parte es de suma importancia seguir mejorando el diseño de las palas ubicando diferentes perfiles a lo largo de su embergadura que aumente no solo producción sino que evite la menor pérdida de producción por falta de mantenimiento por ejemplo limpieza. Mismo otro tema fundamental radica en los materiales y métodos de producción, generalmente imprecisos y costosos por su tiempo de realización [22].

### Grado de Avance

En agosto del 2016 se entregó el trabajo final del PID UTN1899, con título "Estudio de Controles De Paso de Pala Para Aerogeneradores de Baja Potencia". Este trabajo es base muy importante a la propuesta actual, ya que entregó experiencias muy valiosas y resultados que acercan al objetivo propuesto de controlar potencia con sistemas sencillos, económicos, con interesante vida útil y que permitan una adecuada producción energética.

En síntesis, de lo avanzado, se destaca lo siguiente:

#### 1) Primer Etapa:

Prototipo paso fijo.

1.1) Desarrollo, en principio, de un rotor por control de potencia por pérdida aerodinámica "Stall" (por su definición en inglés) de paso fijo y acción de furling. Aunque el prototipo se basa en uno desarrollado (Hugh Piggott), sirve de base para el mejor entendimiento de los factores principales que influyen en el desarrollo de un aerogenerador. Lo indicado permitió realizar mejoras, en el posterior prototipo, tanto en aspectos aerodinámicos como electromecánicos como el desarrollo del control de paso de pala, para esto último a través de sistema mecánico con centrifugos.

1.2) Se modeló, por medio de programa computacional, un método de control de potencia por paso de pala, haciendo énfasis a la zona de trabajo de la turbina eólica por encima de viento nominal de manera de poder comparar contra ensayos de laboratorio y campo.

1.3) Se diseño y construyó un banco de pruebas de aerogenerador de baja potencia en laboratorio de motores de la carrera de ingeniería mecánica, constituido por una carga variable de potencia, carga Dump Load o de exceso de energía, control eléctrico de potencia de carga de baterías y derivación a Dump Load.

1.4) Los cálculos teóricos del PMSG (Generador Sincrónico a Imanes Permanentes), aunque aproximados y basados en experiencias anteriores, dieron resultados satisfactorios de acuerdo a los obtenidos en el banco de prueba.

1.5) En la primera etapa de evaluación aunque se utiliza un variador de velocidad y motor en potencias de más del doble del aerogenerador (1500W), no es posible llegar a la nominal de este último (700W). Se debe

a que el acople directo entre el motor y el generador hace trabajar al primero fuera de su punto óptimo de trabajo (1500rpm), lo cual produce grandes pérdidas por deslizamiento limitando en potencia al variador de velocidad. Para solucionar el problema se adoptó una reducción 3.51:1 y se practicarán nuevamente todas las mediciones pudiendo llegar a potencia superiores a la nominal prevista sobre una carga (784W).

1.6) Las medidas obtenidas indican un desempeño aceptable del generador PMSG en conjunto con baterías, Dump Load, sistema de control eléctrico y diferentes disposiciones de carga.

1.7) El rendimiento del generador, aunque pudiendo ser mayor, dio entre un 70% y 90%, lo cual es aceptable en las potencias de generación que se trabajan por debajo del kW.

1.8) De esta etapa surgieron una cantidad importante de resultados que hacen a la necesidad de búsquedas de mejoras de desempeño y comparaciones con otros prototipos de aerogeneradores, tanto en túnel de viento como en campo.

1.9) Lo interdisciplinario de este trabajo, cabe aclarar que participaron activamente investigadores y becarios de Ing. Electrónica, Mecánica y Aeronáutica, hace que se produzca una valiosa interrelación entre profesionales y alumnos de diferentes áreas de la ingeniería, lo cual es muy probable se replique y sirva de base a los estudiantes para sus trabajos en equipo dentro de la industria.

## 2 )Segunda Etapa:

Primer Prototipo aerogenerador de paso variable, a través de control centrífugo de 200 W de Potencia.

2.1) De la comparación entre lo planificado a través de modelos teóricos y los resultados obtenidos en ensayos de banco de prueba y luego en túnel de viento se determina lo siguiente:

2.1.1) Aunque se encontraron diferencias de desempeño, respecto del análisis teórico, en la zona de regulación de potencia por encima de un viento nominal de alrededor 11.8 m/s, ya que el paso de pala se hace dentro una variación pequeña de giro entre los 680 rpm y 700 rpm, se logra el objetivo de llevar al sistema de generación a un control de potencia en zona estable, es decir para ángulos de ataques bajos, lo cual conduce a un control efectivo por sustentación sin desprendimiento de capa límite y trabajar por lo tanto en una zona de menores cargas aerodinámicas. En este punto se estudia, en principio, la posibilidad de reducir el ángulo de cierre del centrífugo de manera de compensar la caída de captura de potencia.

2.1.2 ) Se ratificó de manera experimental, tanto en banco de prueba como en el túnel de viento, el muy buen desempeño del sistema electrónico de adquisición de ángulo de paso de pala.

2.1.3) Es necesario optimizar el sistema mecánico de centrífugos. Un decremento de los rozamientos disminuiría la histéresis entre la apertura y cierre de las masas centrífugas con lo que se volvería en la curva de potencia hacia vientos menores de manera cercana a la curva de potencia de "ida"; esta disminución en la histéresis de potencia, mejoraría, además de controlar potencia, la producción de energía.

2.1.4) Es necesario realizar un estudio teórico del sistema contemplando su dinámica, de manera de obtener resultados sobre masas centrífugas, coeficientes de resortes, estados de precompresión, y rozamientos que lleven a un mejor desempeño, en especial respecto a la gradualidad en la apertura del paso de pala y en la exactitud de la zona de velocidades de giro en que el sistema de control de potencia deba trabajar.

2.1.5) Aunque las referencias hacen intuir los posibles resultados, es de gran importancia comparar cargas aerodinámicas y producción de energía respecto al sistema de paso fijo y control por furling.

2.1.6) Debido a que el diseño original de las palas tiene como objetivo principal, lograr la máxima simplicidad a la hora de construir las, su geometría no es lo suficientemente idónea para la aplicación en la que son utilizadas. Por tal motivo se ve necesario plantear en trabajo futuro el estudio necesario para la selección y diseño de los perfiles aerodinámico de las palas, que ayude a incrementar la generación energética y contribuya también a mitigar los esfuerzos dinámicos sobre estas con el objetivo de alargar su vida útil. Por las simulaciones y ensayos realizados, al ser su parte interna (intrados) plana (facilidad de construcción) no da un comportamiento aerodinámico óptimo en la zona de control de potencia.

Según lo actuado al momento a través del PID UTI4726TC:

Por lo realizado en el PID 1899 y en función de la idea de trabajo futuro, se propone el PID UTI4726TC en el cual se plantea la mejora del sistema de paso de pala y un análisis más detallado de los resultados analíticos y de túnel de viento del sistema de control de potencia, velocidad de giro y amortiguamiento de cargas aerodinámicas. Dicho estudio se encuentra aún en proceso y tiene fecha de finalización el 31/12/2019. No obstante, en función de los resultados obtenidos hasta la fecha, y su presentación en diversos congresos, se considera importante comenzar con la investigación y desarrollo de los objetivos

planteados en la presentación del presente documento como trabajos futuros del anterior.

### Objetivos de la investigación

#### Objetivo General:

Estudiar y proponer un sistema de rotor para aerogenerador de baja potencia, que mejore desempeño energético respecto de sistemas de paso fijo, con mayor amortiguamiento de cargas aerodinámicas por encima de viento nominal, de bajo costo y sencillez de construcción.

#### Objetivos Específicos:

- 1) Implementar un sistema de control centrífugo de variación de ángulo de palas para aerogeneradores de baja potencia del tipo PIGGOTT.
- 2) Estudiar e implementar un sistema de arranque del rotor a bajas velocidades de viento incrementando de este modo la producción energética, con un control de la velocidad máxima de giro, protegiendo las palas y sus elementos asociados de los efectos nocivos que provocan sobre los mismos las excesivas cargas dinámicas y los fenómenos de fatiga, impidiendo también que el generador eléctrico supere su máxima potencia y tensión permisible.
- 3) Estudiar y proponer la conveniencia de un rediseño del perfil aerodinámico de las palas.
- 4) Estudiar la posibilidad de construir las palas, y otras partes del sistema, por medio de impresión 3D, ya sea en una sola pieza o en varios tramos ensamblados, analizando costos, exactitud respecto de modelado informático, cualidades de repetitividad, y desempeño frente a otros métodos más tradicionales.

### Descripción de la metodología

#### De acuerdo a objetivo general y específicos

#### Enfoque / diseño metodológico:

- 1) Situación de la generación eólica de baja potencia respecto de la problemática del control de la potencia en zona de "vientos fuertes", y producción energética, y a las cargas o esfuerzos estructurales.
- 2) Relevamiento y comparación, según los diferentes métodos de control de potencia en los aerogeneradores de baja potencia, respecto a esfuerzos estructurales en la zona de carga total de sus curvas de potencia.
- 3) Análisis de comportamiento aerodinámico y de producción energética, a través de relevamiento de geometría de pala actual PID 4726TC, por medio software libre "Qblade".
- 4) Propuesta y diseño de nuevo perfil y embergadura de pala por método analítico y computacional.
- 5) Propuesta de materiales y construcción de palas a través de la impresión 3D.
- 6) Análisis del resultado (exactitud, sencillez, estructura mecánica) de la construcción en sistemas de impresión 3D.
- 7) Propuesta de la estrategia de control de potencia en función de los resultados obtenidos en el PID 4726TC.
- 8) Diseño teórico matemático por medio del equilibrio de esfuerzos y momentos del nuevo sistema mecánico de control centrífugo.
- 9) Determinación por medio de programa informático "QBlade" del desempeño teórico del rotor propuesto y el paso de pala necesario para el control de potencia.
- 10) Modelado estático y dinámico, por medio de software computacional, del sistema de control de potencia con control centrífugo.
- 11) Construcción del rotor con sistema mecánico centrífugo.
- 12) Evaluación de resultados y comparación, según diferentes escenarios de prueba en banco de ensayos y velocidades de viento en túnel de laboratorio de aerodinámica y fluidos, respecto a los obtenidos teóricamente.
- 13) Comparación de resultados de desempeño respecto prototipo de paso fijo, tanto en desempeño del control de potencia, producción energética y costos económicos.

#### Métodos, técnicas e instrumentos:

#### Métodos y Técnicas:

- 1) Estudio del problema a través del acervo bibliográfico, y evaluación de resultados de PID anteriores.
- 2) Planteo analítico de propuestas.
- 3) Modelado y simulación.
- 3) Ensayos en banco de prueba y túnel de viento de prototipos experimentales según resultados de

puntos 2) y 3).

4) Evaluación y comparativas de los resultados obtenidos entre los diferentes métodos.

5) Comparativa con los desarrollos actuales.

6) Propuesta de Mejoras

**Instrumentos:**

1) Software de modelado QBlade, Matlab, y de desarrollo de sistemas mecánicos.

2) Instrumentos de medición de tensiones, corrientes, y frecuencia estatística de generador eléctrico, velocidades de giro de rotor, velocidades de viento y ángulo de paso de pala.

3) Celdas de carga.

4) Banco de Ensayo.

5) Túnel de viento.

**Unidades de Análisis:**

1) Estado del arte y resultados de trabajos anteriores (PID).

2) Rediseño de palas.

3) Caracterización geométrica del rotor aerodinámico (perfil alar con su embergadura) dentro del sistema informático QBlade.

4) Verificación y evaluación de su desempeño con software de punto anterior, y de los ángulos necesarios de paso de pala según estrategia de control de potencia.

5) Construcción de palas con impresión 3D.

6) Realización de sistema mecánico de control de paso centrífugo a través de su modelado en software, ejemplo SolidWorks.

7) Modelado estático a través de las ecuaciones de equilibrio de momentos de fuerzas. Determinación de la relación entre velocidad angular de giro y ángulo de paso de pala en función de las variables mecánicas y aerodinámicas del sistema (precompresión de resortes, constantes de resortes, masas, rozamientos y acción de coeficiente aerodinámico "Cm").

8) Modelado dinámico del sistema y simulación, a través de software, ej. Matlab.

9) Construcción de prototipo experimental.

10) Resultados experimentales de ensayos en banco de prueba y túnel de viento.

11) Verificación de resultados con aquellos analíticos, y de sistema informático.

12) Comparación de resultados respecto a sistemas de paso de pala fijo.

## 12. Contribuciones del Proyecto

### Contribuciones al avance científico, tecnológico, transferencia al medio

1) Relevante importancia al idear una metodología de trabajo que aplique de apoyo para el desarrollo de futuros aerogeneradores sin necesidad de incurrir en costosos prototipos donde la utilización del método de prueba y error suele ser la característica de trabajo predominante.

2) Agregar innovación y desarrollo en la energía eólica de baja potencia, donde hay una gran necesidad, dada la elevada inversión inicial respecto de sistemas convencionales, de bajos costos y sistemas confiables con larga vida útil. Para ello es importante lograr novedosos dispositivos con buen desempeño en la producción energética y confiables en la franja de vientos, de elevada frecuencia de ocurrencia, entre los 11m/s a 16m/s, donde un buen control de potencia es fundamental para amortiguar cargas y por lo tanto disminuir mantenimientos y aumentar vida útil.

3) Permitir contribuir como fuente de información e innovación a una incipiente industria nacional en tan importante área energética, que aplique en fundamental a solucionar problemas de acceso a la energía eléctrica a comunidades aisladas. Mismo a disminuir el costo y mejorar la sustentabilidad de su energía ya que muchas en este momento la obtienen por la quema ineficiente de la biomasa del lugar, o utilización de combustible fósil de elevado costo por temas de logística.

4) Por otro lado, con la nueva ley de generación distribuida, dar herramientas de mejora a la industria eólica de baja potencia, ofreciendo con esta idea equipos con mejor desempeño y vida útil, para todos aquellos que quieran ingresar a ser prosumidores del sistema eléctrico, disminuir costos y volcar su excedente de generación.

5) Generar capacidades y formación de recurso humano con alto requerimiento de las industrias vinculadas al área.

6) Propender a la diversificación de nuestra matriz energética por medio de métodos limpios y sustentables.

### Contribuciones a la formación de Recursos Humanos



- 1) La energía eólica es hoy en día, en el concierto mundial, con crecimientos interanuales no menores al 20%, la disciplina que mayor cantidad de mano de obra está requiriendo. Aunque es de hacer notar, dicho recurso humano, deberá estar entrenado y calificado para la realización de la amplia cantidad de tareas que esta reúne.
- 2) Se puede decir que casi todas las ingenierías aplican a este tipo de generación de energía, como la Aeronáutica, Estructuras, Eléctrica, Electrónica, Ambiental, Industrial, Civil, Mecánica, y además todas aquellas ligadas al análisis del recurso eólico como la Matemática, Probabilidad y Estadística, Meteorología y Sistemas.
- 3) Investigaciones y desarrollos actuales en otras regiones indican que cada vez más recurso humano estará ligado a las energías renovables y fundamentalmente a la eólica por ser de entre estas, la de mayor escala.
- 4) Se estima a nivel mundial llegar antes del 2020 a 1TW (1000GW) de potencia instalada de energía eólica. En la Argentina en los tres últimos años, a través del programa Renovar y Mercado a Término se encuentran entre operación y adjudicados más de 2.5GW de potencia, aunque esto último es alta potencia se presume llegar en 10 años a no menos de 1GW en sistemas distribuidos de baja potencia, en donde la eólica jugara en regiones que lo permita el recurso un papel preponderante, y para llevarla adelante se necesitara personal calificado en tecnología, instalación, operación y mantenimiento. Es decir que en este campo energético, se abre una gran oportunidad de trabajo para todos aquellos que quieran participar con esfuerzo y dedicación. Este estudio y trabajo logicamente contribuye con lo indicado.
- 5) Políticas venideras y algunas de reciente concreción respecto a lo indicado en este trabajo, como ser las referidas a la disminución de reservas de los combustibles fósiles, el aumento de su precio y la elevada contaminación, hacen preveer una prometedor necesidad de recurso humano en tan vital área energética.
- 6) Los objetivos planteados en este trabajo contribuirán al desarrollo conjunto de diferentes áreas de la ingeniería, en un proyecto común, de relevante importancia en el campo energético. Permitiendo no solo la transferencia horizontal y vertical dentro de una rama de la ingeniería sino la interrelación de ellas. Por ejemplo, cabe aclarar, que todas las carreras dentro de la Facultad Regional Haedo fueron altamente vinculadas a través de los PID UTN1899 y UTI4726TC, del cual este es continuidad.
- 7) Se necesitarán, si se analiza el trabajo planteado, conocimientos aeronáuticos, mecánicos, electrónicos e industriales, por citar algunas disciplinas, todas estas dentro de nuestra Regional FRH.
- 8) Contribuirá notablemente a la tarea del trabajo en equipo, ya observado por lo desarrollado a través de los PID UTN1899 y PID UTI4726TC respectivamente. Aspecto fundamental para la buena consecución de cualquier proyecto industrial.
- 9) Dar apoyo a la formación o mejora de los cursos referidos a las energías alternativas, contribuyendo en su contenido y a las capacidades que se buscan del egresado de los mismos.
- 10) Cabe aclarar que en la Facultad Regional Haedo, a partir del año 2012, en la carrera de ingeniería electrónica, se viene dictando la asignatura electiva "Introducción a la Energía Eólica", y a partir del año 2018, en las carreras de ingeniería industrial y mecánica respectivamente se comenzó a dictar la asignatura electiva "Introducción a las Energías Renovables", asignaturas que en todos los casos están íntimamente relacionadas con los temas abordados en el presente proyecto de investigación.

### 13. Cronograma de Actividades

Año	Actividad	Inicio	Duración	Fin
1	Revisión Bibliográfica y planteo del problema	01/01/2020	6 meses	30/06/2020
1	Diseño de los elementos del sistema de control centrífugo	01/04/2020	3 meses	30/06/2020
1	Ensayos y obtención de datos en túnel de viento.	01/04/2020	2 meses	31/05/2020
1	Fabricación del sistema de control centrífugo.	01/08/2020	5 meses	31/12/2020
2	Fabricación del sistema de control centrífugo.	01/01/2021	4 meses	30/04/2021
2	Estudio y selección de los perfiles aerodinámicos de las palas.	01/04/2021	2 meses	31/05/2021
2	Ensayos de funcionamiento en túnel de viento.	01/05/2021	2 meses	30/06/2021
2	Simulación de comportamiento de perfiles de palas seleccionado.	01/05/2021	2 meses	30/06/2021
2	Fabricación de palas según perfiles seleccionados.	01/07/2021	3 meses	30/09/2021
2	Evaluación de los resultados obtenidos de todo lo actuado y estudio de posibles mejoras.	01/10/2021	3 meses	31/12/2021
2	Ensayos de funcionamiento en túnel de viento con nuevo diseño de palas	01/10/2021	2 meses	30/11/2021

**14. Conexión del grupo de Trabajo con otros grupos de investigación en los últimos cinco años**

Grupo Vinc.	Apellido	Nombre	Cargo	Institución	Ciudad	Objetivos	Descripción
Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos de la UTN FRH	de Villaflor	Alejandro Blas	INVESTIGADOR FORMADO	UTN FRH	Buenos Aires	Utilización de Túnel de Viento	Conocimientos sobre comportamiento aerodinámico de aerogeneradores de eje horizontal

**15. Presupuesto**

**Total Estimado del Proyecto: \$ 3668925,00**

**15.1. Recursos Humanos - Inciso 1 e Inciso 5**

**Primer Año**

Becarios Inciso 5	Cantidad	Pesos	Origen del financiamiento
1. Becario Alumno Fac.Reg.	1	\$ 37557,00	Facultad Regional
2. Becario Alumno UTN-SAE	0	\$ 0,00	-
3. Becario Alumno UTN-SCTyP	0	\$ 0,00	-
4. Becario BINID	0	\$ 0,00	-
5. Becario Posgrado-Doctoral en el país	0	\$ 0,00	-
6. Becario Posgrado Doctoral en el extranjero	0	\$ 0,00	-
7. Becario Posgrado - Especialización	0	\$ 0,00	-
8. Becario Posgrado - Maestría en el país	0	\$ 0,00	-
9. Becario Posgrado - Maestría en el extranjero	0	\$ 0,00	-

Docentes Investigadores y Otros - Inciso 1	Cantidad	Pesos
1.Administrativo	0	\$ 0,00
2.CoDirector	1	\$ 332780,00
3.Director	1	\$ 209700,00
4.Investigador de apoyo	2	\$ 243578,00
5.Investigador Formado	2	\$ 754657,00
6.Investigador Tesista	0	\$ 0,00
7.Otras	0	\$ 0,00
8.Técnico de Apoyo	0	\$ 0,00

Totales	Inciso 5	Inciso 1	Total
Primer Año	\$ 37557,00	\$ 1540715,00	\$ 1578272,00

**Segundo Año**

Becarios Inciso 5	Cantidad	Pesos	Origen del financiamiento
1. Becario Alumno Fac.Reg.	1	\$ 46946,00	Facultad Regional
2. Becario Alumno UTN-SAE	0	\$ 0,00	-
3. Becario Alumno UTN-SC TyP	0	\$ 0,00	-
4. Becario BINID	0	\$ 0,00	-
5. Becario Posgrado-Doctoral en el país	0	\$ 0,00	-
6. Becario Posgrado Doctoral en el extranjero	0	\$ 0,00	-
7. Becario Posgrado - Especialización	0	\$ 0,00	-
8. Becario Posgrado - Maestría en el país	0	\$ 0,00	-
9. Becario Posgrado - Maestría en el extranjero	0	\$ 0,00	-

Docentes Investigadores y Otros - Inciso 1	Cantidad	Pesos
1.Administrativo	0	\$ 0,00
2.CoDirector	1	\$ 415974,00
3.Director	1	\$ 262125,00
4.Investigador de apoyo	2	\$ 304456,00
5.Investigador Formado	2	\$ 943320,00
6.Investigador Tesista	0	\$ 0,00
7.Otras	0	\$ 0,00
8.Técnico de Apoyo	0	\$ 0,00

Totales	Inciso 5	Inciso 1	Total
Segundo Año			

Segundo Año	\$ 46946,00	\$ 1925875,00	\$ 1972821,00
-------------	-------------	---------------	---------------

TOTAL GENERAL	Inciso 5	Inciso 1	Total General
Todo el Proyecto	\$ 84503,00	\$ 3466590,00	\$ 3551093,00

### 15.2 Bienes de consumo - Inciso 2

Año del Proyecto	Financiación Anual	Solicitado a
1	\$ 25.000,00	UTN - SCTyP
2	\$ 25.000,00	UTN - SCTyP
Total en Bienes de Consumo		\$ 50.000,00

### 15.3 Servicios no personales - Inciso 3

Año	Descripción	Monto	Solicitado a
1	Presentación en congresos.	\$ 10.000,00	UTN - SCTyP
2	Presentación en congresos.	\$ 10.000,00	UTN - SCTyP
Total en Servicios no personales			\$ 20.000,00

### 15.4 Equipos - Inciso 4.3 - Disponible y/o necesario

Año	Disp/Nec	Origen	Descripción	Modelo	Otras Espec.	Cantidad	Monto Unitario	Solicitado a
1	Disponible	Laboratorio de electrónica de la UTN FRN	Medidor de calidad de energía	FLUKE 434	Medidor, registrador y evaluador de variables eléctricas	1,00	\$ 0,00	Facultad Regional
1	Disponible	Laboratorio de Electrónica	Osciloscopio de almacenamiento digital	Tektronix TDS 200		2,00	\$ 0,00	Facultad Regional
1	Disponible	Laboratorio de Electrónica	Multímetro digital	Tektronix TX1	-	2,00	\$ 0,00	Facultad Regional
1	Disponible	Laboratorio de Aeronáutica y Fluidos	Túnel de viento e instrumental asociado	EIFEL de vena abierta	10 m de largo - velocidad máxima 18 m/s	1,00	\$ 0,00	Facultad Regional
1	Disponible	Laboratorio de Aeronáutica y Fluidos	Impresora 3D	FLYBEAR TORNADO	Area de impresión 350 x 300 x 300 mm con cabezal simple	1,00	\$ 0,00	Facultad Regional
Total en Equipos							\$ 0,00	

### 15.5 Bibliografía de colección - Inciso 4.5 - Disponible y/o necesario

Año	Disp/Nec	Origen	Descripción	Modelo	Otras Espec.	Cantidad	Monto Unitario	Solicitado a
1	Necesario	Inglés	Wind Energy Handbook, Segunda Edición (2011)	-	-	1,00	\$ 6.000,00	Facultad Regional
1	Necesario	Inglés	Small_Wind_Turbines_Analysis,_Design, (2011)			1,00	\$ 8.000,00	Facultad Regional
1	Necesario	Inglés	IEC 61400-2 Ed. 3.0 b:2013	-	Normativa de diseño, seguridad y operación y mantenimiento de pequeños aerogeneradores	1,00	\$ 18.000,00	Facultad Regional
1	Necesario	Dinamarca	Small Wind Turbine Engineering: From idea to certification (2015)	-	-	1,00	\$ 3.000,00	Facultad Regional
2	Necesario		Small_Wind_Turbines_Analysis,_Design, (2011)			1,00	\$ 8.000,00	Facultad Regional
2	Necesario	Dinamarca	Small Wind Turbine Engineering: From idea to certification (2015)	-	-	1,00	\$ 3.000,00	Facultad Regional
Total en Bibliografía							\$ 46.000,00	

### 15.6 Software - Disponible y/o necesario

Año	Disp/Nec	Origen	Descripción	Modelo	Otras Espec.	Cantidad	Monto Unitario	Solicitado a
1	Disponible	Código abierto	Software de simulación multiplataforma de código abierto para el diseño de palas de aerogeneradores.	QBlade		1,00	\$ 0,00	Seleccione origen de financiamiento

2	Disponible	Código abierto	Software de simulación multiplataforma de código abierto para el diseño de palas de aerogeneradores.	QBlade	-	1,00	\$ 0,00	Seleccione origen de financiamiento
Total en Software							\$ 0,00	

### 16. Co-Financiamiento

Año	RR.HH.	Bienes de Consumo	Equipamiento	Servicios no personales	Bibliografía	Software	Total
1	\$1.578.272,00	\$25.000,00	\$0,00	\$10.000,00	\$35.000,00	\$0,00	\$1.648.272,00
2	\$1.972.821,00	\$25.000,00	\$0,00	\$10.000,00	\$11.000,00	\$0,00	\$2.018.821,00
Total del Proyecto	\$3.551.093,00	\$50.000,00	\$0,00	\$20.000,00	\$46.000,00	\$0,00	\$3.667.093,00

#### Financiamiento de la Universidad

Universidad Tecnológica Nacional - SCyT	\$ 70.000,00
Facultad Regional	\$ 3.597.093,00

#### Financiamiento de Terceros

Organismos públicos nacionales (CONICET, Agencia, INTI, CONEA, etc.)	\$ 0,00
Organismos / Empresas Internacionales / Extranjeros	\$ 0,00
Entidades privadas nacionales (Empresas, Fundaciones, etc.)	\$ 0,00
Otros	\$ 0,00
<b>Total</b>	<b>\$ 3.667.093,00</b>

#### Avales de aprobación, Financiamiento y Otros

	Orden	Nombre de archivo	Tamaño
<a href="#">Descargar</a>	1	AVAL_SICyT_6622_Versaci.pdf	2972953
<a href="#">Descargar</a>	2	CV2019_04_Ruben_Bufanio.pdf	452879
<a href="#">Descargar</a>	3	CV_Alejandro_de_Villaflor.pdf	103802
<a href="#">Descargar</a>	5	CV_Javier_Rubido.pdf	174388
<a href="#">Descargar</a>	6	CV_Mariano_Flores.pdf	70456
<a href="#">Descargar</a>	7	CV_Carlos_Stortoni.pdf	201308
<a href="#">Descargar</a>	8	AVALCD_196_19_VERSACI.pdf	2921109
<a href="#">Descargar</a>	9	AVALD_598_19_VERSACI.pdf	3843449

#### Currículums (Currículums de los integrantes cargados en el sistema)