

---

---

## DIVERSIDAD EN TECNOLOGÍAS PARA EL DESARROLLO DE TURBINAS EÓLICAS

---

---

Diversity in Technologies for the Development of Wind Turbines

**Ernesto Yoel Fariñas Wong**  
**Yanelys Delgado Triana**

**Resumen:** En los reportes analizados se aprecia que las turbinas con eje horizontal construidas bajo el concepto danés son las más extendidas, sin embargo los generadores asincrónicos usados en estas así como sus sistemas de orientación no es aplicable a las pequeñas turbinas eólicas, por lo que estas son fabricadas a partir de generadores de imanes permanentes con diferentes configuraciones, siendo necesarios aplicar nuevos sistemas de orientación y protección dada la amplia variedad de condiciones de funcionamiento en las pequeñas máquinas eólicas. Este sistema por momento en la cola ha resultado ser el preferido por los especialistas en el tema.

**Palabras claves:** Diversidad, desarrollo de turbinas eólicas, aerogeneradores, *small wind turbine*, tecnología eólica.

**Abstract:** In the reports analyzed shows that the horizontal axis turbines built under the Danish concept are the most widespread, however asynchronous generators used in these systems and their orientation is not applicable to small wind turbines, so these are made from permanent magnet generators with different configurations, being necessary to implement new guidance and protection systems given the wide variety of operating conditions in small wind machines. This system currently queuing emerged as the preferred by specialists in the field.

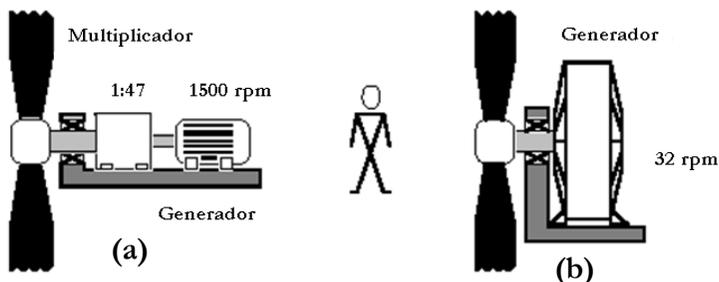
**Keywords:** Diversity, development of wind turbines, wind turbines, small wind turbine, wind technology.

## 1. Análisis de los diferentes sistemas de transmisión de potencia mecánica. Costos

En los trabajos de Eggers, A. J.; Chaney (2011); Ferris, L. L. (2000); Garrel, A. (2011) y Grauers (2011) se constata que casi todos los aerogeneradores de potencia superior a los 50 kw utilizan en su tren de potencia el conocido como “concepto danés” de máquina eólica, el cual consiste en un rotor *tripala* acoplado a un multiplicador de engranes y la salida de este a un generador asincrónico, figura N.º 1(a). Con esta configuración se logra que la velocidad de rotación del generador aumente considerablemente, ya que la velocidad del rotor en la turbina es significativamente más baja que la velocidad necesaria para generar corriente eléctrica en el generador asincrónico.

Figura N.º 1

Esquemas de aerogeneradores con diferente tren de potencia:  
a) con multiplicador de engranes y b) acoplado directamente



Existen algunas máquinas eólicas con potencia alrededor de los 10 kW construidas bajo el concepto danés, pero son mínimas y no se han generalizado, debido a que la relación entre el peso, costo de la torre y cimientos es muy desfavorable contra la potencia entregada por el generador; razones por las que los pequeños aerogeneradores se han desarrollado a base de otra concepción que incluye un generador de imanes permanentes directamente acoplado al rotor.

En el segmento de las grandes máquinas, una alternativa desarrollada hace relativamente pocos años se está abriendo camino gracias al desarrollo de la electrónica de potencia altamente eficiente, esta variante brinda la posibilidad de instalar grandes generadores multipolos que giran a bajas velocidades y están acoplados directamente al rotor multipalas, esta configuración actualmente es limitada a un número reducido de fabricantes, como puede apreciarse en la figura N.º 1(b); de esta forma se elimina el paso de multiplicación, por lo que ha recibido el nombre genérico de aerogeneradores acoplados directamente.

Existen razones para que se proyecte el uso de generadores acoplados directamente, ya que se disminuye el costo de la electricidad producida, debido a que se reduce el costo del tren de potencia y por lo tanto se disminuyen las pérdidas por conversión de energía. Conjuntamente mejorará la disponibilidad en el equipo y el ruido de la máquina eólica se hace menor.

Los costos reportados por Versteegh (2010) para máquinas que utilizan el sistema de generación del rotor directamente acoplado al generador muestran que esta tecnología podría llegar a ser una alternativa viable en el futuro de los aerogeneradores, debido a que disminuyen los costos de mantenimiento en un 30%, los costos de seguro son menores en un 25%; siendo el rendimiento eléctrico superior en un 2% y la disponibilidad de las máquinas es superior a aquellas máquinas que utilizan multiplicador de velocidad, adicionalmente este autor plantea que una de cada cinco turbinas eólicas hay que sustituirle el multiplicador de velocidad pasado el tiempo de garantía.

Por otra parte, además de la reducción del costo por unidad de peso, la reducción del ruido es importante en la solicitud de permisos para instalar estos equipos cerca de lugares habitados, logrando entre otros factores que esta configuración sea muy común en los pequeños aerogeneradores.

## **2. Descripción del tipo y potencia del generador eléctrico**

### **2.1 GENERADORES ASINCRÓNICOS**

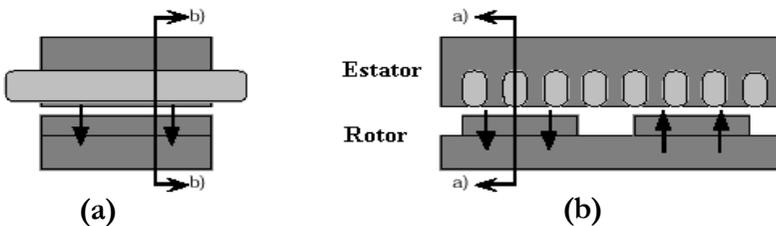
Los generadores más difundidos en las grandes máquinas eólicas son los asincrónicos, constituyen unas máquinas muy fiables y estables en su trabajo, sin embargo, requieren de altas velocidades de giro, lo que obliga a la instalación de multiplicadores, este tipo de generador por lo general no se utiliza en potencias menores a 50 kW.

Sin embargo desde hace varios años se construyen máquinas eólicas de la firma alemana Enercon y Suzlon de la India, con generadores de baja velocidad que ha permitido la eliminación del paso de multiplicación en sus megaturbinas, hasta su salida solo se lograba con generadores de imanes permanentes, pero estos presentan limitaciones serias por el costo de los materiales involucrados en la fabricación para lograr altas potencias.

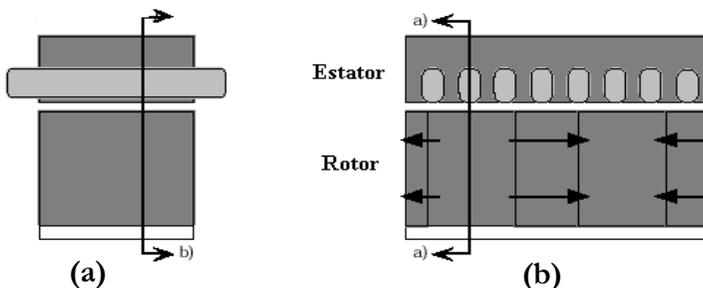
## 2.2 GENERADORES DE IMANES PERMANENTES, PMG

Los generadores de imanes permanentes no han tenido éxito en las grandes máquinas, principalmente por el costo del imán permanente, pero en las pequeñas máquinas con decenas o cientos de watts se han tornado imprescindibles, desarrollándose una amplia gama, los cuales han tomado el nombre según el comportamiento del campo magnético o por la forma del propio generador, siendo los más usados en máquinas comerciales los de flujo axial tal como se aprecia en la figura N.º 2. Y los de flujo radial, véase la figura N.º 3 Thiringer, T. (2009):

**Figura N.º 2**  
**Vista en corte de un generador PMG de flujo axial,**  
**con imanes montados en la superficie,**  
**a) vista tangencial y b) vista axial**



**Figura N.º 3**  
**Vista en corte de un generador PMG de flujo radial**  
**con concentración de flujo**  
**a) vista tangencial y b) vista axial**



Se han desarrollado otras configuraciones de generadores de imanes permanentes como el de flujo axial con estator toroidal e imanes montados en la superficie del rotor, el de flujo axial con estator doble con bobinados en el rotor y el de flujo tangencial, los cuales son variantes o híbridos de las dos primeras, sin embargo, tienen un costo muy superior.

### 3. Análisis del costo contra el tamaño del rotor

En los grandes aerogeneradores es un hecho consumado que el costo de la potencia instalada es de 1000 USD por kilowatt, en las pequeñas máquinas eólicas se comporta con grandes variaciones, como lo muestra la tabla N.º 1. (Durstewitz, 2010).

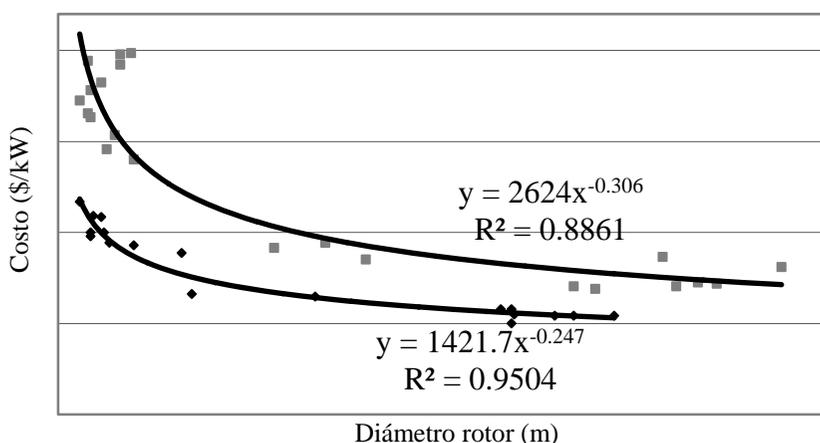
Tabla N.º 1  
Tabla del costo de diferentes aerogeneradores de pequeña potencia

Turbina eólica	Pont. (kW)	Costo (\$)	Razón (\$/W)
Air X	0,4	680	1,7
Air Marine	0,4	875	2,2
Whisper 100	0,9	2,085	2,3
Marlec	1	2,975	3,0
Whisper 200	1	2,490	2,5
Whisper 500	3	8,970	3,0
Vertical	6	25,000	4,2
Bergey Excel S	10	22,900	2,3
Jacobs	20	23,500	1,2
Bergey Excel R	7,5	19,400	2,6

Como se observa, la relación costo *vs* potencia en los pequeños aerogeneradores puede ser de dos o hasta tres veces mayor si la comparamos con las grandes máquinas, factor que se relaciona con que aún en las pequeñas máquinas la tecnología utilizada no está consolidada y madura, tal como ocurre en los grandes aerogeneradores.

Se ha podido comprobar que en la medida que disminuye el tamaño del rotor aumenta el costo por kilowatt, figura N.º 4, lo que indica la coexistencia de varias tecnologías para un mismo tamaño de rotor, comportamiento que se acentúa en los rotores más pequeños, lo que demuestra que es precisamente en estos donde aún la tecnología es más débil y los diseños de equipos menos terminados.

**Figura N.º 4**  
**Franja de costo para diferentes tecnologías de aerogeneradores**

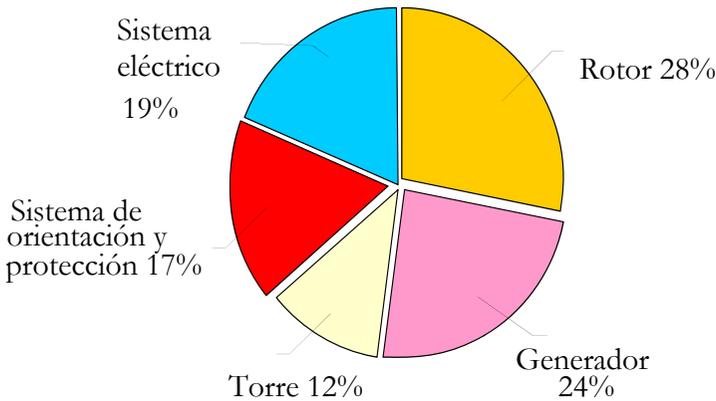


En los pequeños aerogeneradores si bien se ha llegado a cierta uniformidad en cuanto a los materiales y tecnología empleados en la fabricación de los rotores, torres y generadores eléctricos, generalmente de imanes permanentes, no ha ocurrido lo mismo con los sistemas de orientación y regulación, los que presentan una gama amplia en todos los órdenes y han contribuido a la variación de los costos como bien lo muestra la figura N.º 4.

En los aerogeneradores pequeños si bien el generador, el rotor, la torre y el sistema eléctrico alcanzan hasta un 83% del costo de una pequeña máquina eólica, el resto (17 %), figura N.º 5, está relacionado con los sistemas que garantizan el control y auto frenado. Dicho sistema varía en una amplia gama de conceptos y funcionalidad de

un fabricante a otro, siendo su buen funcionamiento determinante para la entrega de potencia, supervivencia ante eventos extremos y en el costo total.

**Figura N.º 5**  
**Distribución del costo de los diferentes sistemas de un pequeño aerogenerador**



El desarrollo de los pequeños aerogeneradores se ha visto limitado por la poca profundidad en el análisis de los fenómenos aerodinámicos, se advierte la necesidad de un análisis específico sobre los sistemas de orientación y protección, los cuales han sido en general limitados: esto provoca problemas aeroelásticos en el rotor, en la torre y en el generador eléctrico, así como ruido aerodinámico, reflejo de las pérdidas en la captación de energía del viento.

Gipe (2000) planteó que para revertir la situación era necesario un estudio tanto analítico como experimental de los sistemas de orientación y protección utilizados en estas máquinas. En este marco Piggott (2006) propone la utilización del “sistema de orientación y protección por momento de cola” (*SOPMC*) en aerogeneradores de eje horizontal con rotor frente al viento, versiones de este sistemas se estudiaron en diferentes prototipos por Corbus (2005) y Bikdash

(2004); estos reportes concluyen que la utilización del sistema era viable, sin embargo, para aumentar la eficiencia y atenuar los problemas aeroelásticos presentes en los prototipos ensayados era necesario el desarrollo de métodos que tuvieran en consideración la aerodinámica para el cálculo de la veleta de cola, debido a que esta se había convertido en un componente activo en la regulación y no solo como un elemento para la orientación o decorativo.

#### **4. Sistema de orientación y protección por momento de cola (SOPMC)**

El sistema de orientación y protección por momento de cola se ha utilizado en diferentes variantes como respuesta a los problemas que existen con los sistemas de orientación de los aerogeneradores del mercado, en un inicio fue considerado como un sistema híbrido de los utilizados en pequeñas aeroturbinas comerciales, tales con los Whisper, Bornay o Berguey. Las cuales utilizan como método para controlar la velocidad de giro del rotor el desvío del rotor de la acción directa del viento, pero para el nuevo sistema Piggot (2006) propone que se logre colocando el eje de giro del aerogenerador en una posición excéntrica respecto al eje de giro del rotor, mientras que el movimiento de desorientación así como la fuerza para el retorno del rotor a la posición de frente al viento debe ser lograda mediante el momento de inercia de la cola y no por la presencia de mecanismos adicionales, tal como ocurre en las máquinas comerciales actuales, las cuales se basan en la utilización de resortes o cilindros hidráulicos, los cuales se averían con facilidad producto del ambiente difícil en que trabajan estas máquinas y la cantidad de veces que deben entrar en funcionamiento.

Para utilizar el momento de inercia de la cola en estas funciones es necesario que el soporte de la cola o veleta de orientación de los pequeños aerogeneradores tenga características muy específicas, si se comparan con las que actualmente están en funcionamiento, estas últimas solo se habían utilizado como elementos para lograr la

alineación del rotor con la dirección del viento o como elemento decorativo, al utilizarla en funciones de regulación y protección jugarán un papel activo en el control de la máquina, por lo que su configuración en cuanto a peso, materiales, geometría, estructura y forma de sujeción al cuerpo del aerogenerador deben ser definidas en relación al peso del aerogenerador y tamaño del rotor en función de la velocidad del viento.

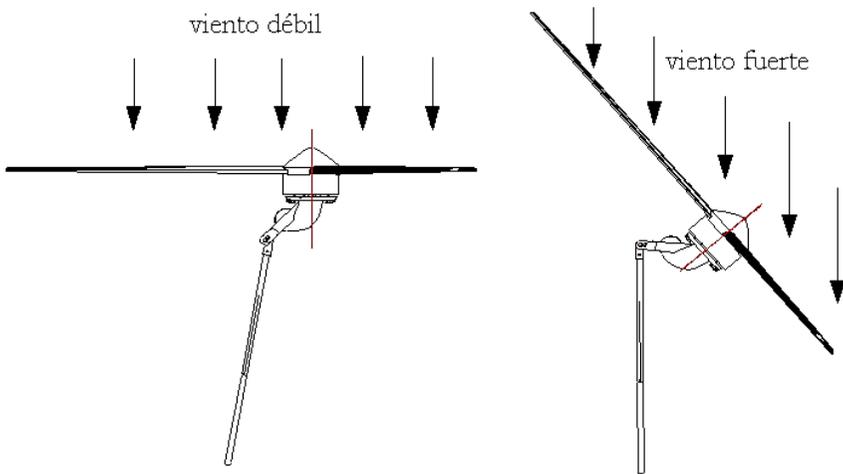
Es conocido que los pequeños aerogeneradores tienen su veleta de orientación a cierta distancia del eje de giro de la máquina o sistema de posicionamiento “Yaw System” por lo que existe una fuerza o momento que siempre estará actuando sobre ese punto del aerogenerador, esta fuerza es la que se utiliza para controlar y regular en este tipo de sistema.

Para que la máquina tenga un buen funcionamiento y el sistema a dimensionar supere los que existen actualmente es necesario que la acción provocada sea tal que logre hacer girar al aerogenerador suavemente cuando la velocidad del viento aumente por encima de cierto valor, manteniendo un ángulo entre la dirección del viento y el rotor, tal que logre el giro de este, sin grandes variaciones en la entrega de electricidad. También tiene que ser capaz de evitar los estados vibratorios comunes en los sistemas actualmente utilizados. Esta acción puede lograrse mediante la conjugación del montaje de la cola sobre una bisagra inclinada y la excentricidad propuesta por Piggot H., provocando que, en caso de velocidades de vientos menores a las que fue diseñada, se mantenga en una posición frente al viento, mientras que cuando los vientos son fuertes la cola se levantará haciendo girar el aerogenerador sobre el sistema de posicionamiento. (Figura N.º 6).

La concepción de este sistema de orientación busca lograr características capaces que las máquinas que lo utilicen sean más fiables y menos costosas durante su explotación, al no ser necesario mecanismos de resortes, engranajes o lubricación, así como las

molestas paradas por mantenimiento dada las características de estos equipos, al ser utilizados en sistemas autónomos, instalados fuera de las redes eléctricas nacionales.

**Figura N.º 6**  
**Pequeño aerogenerador con sistemas de orientación por momento de inercia en la cola, vista superior.**



Sin embargo, según Sánchez (2007), tiene el inconveniente de ser un sistema complejo en lo referido al tema de cálculo debido a la dependencia de coeficientes de sustentación, arrastre, momentos y productos de inercia que se originan durante el funcionamiento del aerogenerador. Haciendo que el cálculo del mismo sea un complejo sistema de ecuaciones y coeficientes experimentales que ha traído como consecuencia que estos sistemas de orientación, hasta el momento, basen su desarrollo en pruebas de campo por el método de tanteo y error, incrementando notablemente los costos y tiempo de colocar un equipo con este sistema en condiciones de trabajo.

Por sus características de inexistencia de accesorios adicionales, tales como resortes, pistones hidráulicos, puntos de engranes o sistemas eléctricos y electrónicos se deben diseñar aeroturbinas que utilicen tal

sistema, mucho más, bajo las condiciones y la poca cultura de mantenimiento que en general poseen los explotadores de pequeños aerogeneradores a los cuales además se le hace difícil lograr el recambio de pizas averiadas.

## **5. Conclusiones**

Es significativa la diversidad tecnológica existente en el sector de las pequeñas máquina eólicas, lo que se demuestra por el amplio espectro existente en el costo de estas máquinas, además de ser hasta tres veces superior al de los grandes aerogeneradores, sin embargo, ninguna de las tecnologías se considera actualmente constituida. Los generadores asincrónicos y los multipolos son utilizados en grandes máquinas eólicas mientras que en las pequeñas son más usados los de imanes permanentes, debido a los costos de los imanes.

Al analizar el costo de las diferentes partes de un pequeño aerogenerador se ve que el costo del sistema de orientación y protección es de un 17 % del total, sin embargo este puede ser el causante de problemas de funcionamiento y de supervivencia así como de la baja eficiencia de estas máquinas.

Los sistemas de orientación utilizados actualmente en las aeroturbinas no utilizan la veleta y la cola como un elemento activo en el control y protección de la máquina, por lo que su estructura, peso y forma nunca ha sido de interés en los métodos de cálculo de los pequeños aerogeneradores que se comercializan actualmente.

El sistema de orientación de regulación por momento de inercia en la cola debido a su complejidad de análisis físico matemático se ha desarrollado a partir de criterios empíricos, utilizándose para su dimensionamiento los resultados de experimentos de tanteo y error, por lo que es necesario organizar metodológicamente su cálculo a través de modelos matemáticos y análisis de simulación numérica que permita el desarrollo de este tipo de sistema de orientación para máquinas eólicas pequeñas.

Debido a la simplicidad estructural y de componentes mecánicos activos de los sistemas de orientación por momento de inercia en la cola estos deben ser utilizados en el diseño de pequeñas turbinas eólicas.

## 7. Referencias bibliográficas

Bikdash, M.; Chen, D. A. y Harb, M. (2004): A Hybrid Model of a Small Autofurling Wind Turbine. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 7, pp. 127-148.

Corbus, D.; Meadors, M. (2006, octubre): *Small Wind Research Turbine* [Final Report Technical Report NREL/TP-500-38550]. Recuperado (s. f.) de <http://www.osti.gov/bridge>.

Durstewitz M. (2010, 22 de junio). *Experience Curves for Wind and Observed Cost Reductions ISET*. Paris: International Energy Agency.

Eggers, A. J.; Chaney, K. (2011). *Modeling of Yawing and Furling Behavior of Small Wind Turbines*. (38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit). Reno, Nevada: American Society of Mechanical Engineers: 1-11.

Ferris, L. L. (2000). *Wind Energy Conversion Systems*. New York: Prentice Hall.

Garrel, A. (2011). *Development of a Wind Turbine Aerodynamics Simulation Module ECN-C-03-079* [Recurso electrónico]. Países Bajos: Energy Research Netherlands. Recuperado (s. f.) de [www.ecn.nl/docs/library/report/2003/c03079.pdf](http://www.ecn.nl/docs/library/report/2003/c03079.pdf)

Grauers, A. (2011); *Design of Direct –Driven Permanent – Magnet Generators for Wind Turbines Technical Report N.º 292*. Gothenburg, Suecia: The School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology.

- Gipe, P. (2000). Noise from Small Wind Turbines: An Unaddressed Issue. *Chelsea Green*. Escocia: DOVER PUBLICATIONS, INC.
- Piggott, H. (2006). *Windpower Workshop*. United Kingdom: Editorial Renacer.
- Sánchez, T. (2007, s. f.). El programa de energía de ITDG-Perú [Entrevista sostenida con el autor].
- Thiringer, T. (2009). *Measurement and Modelling of Low-Frequency Disturbances in Induction Machines*. [Doctoral Thesis]. Göteborg, Suecia: Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering.
- Versteegh, C. J. A. (2010). *Design of the Z72 Wind Turbine with Direct Drive PM Generator*. Trondheim: W.W. NORTON & COMPANY.

### **Ernesto Yoel Fariñas Wong**

Es ingeniero Mecánico (UCLV) 1994, tiene una maestría en Termoenergética Industrial (UCLV) y doctorado en Termodinámica (2008) por la UCLV. Curso post doctorado en la UNAM (DF) 2010 y la VUB de Bruselas (2012). Ha sido docente en la educación superior durante 19 años. Actualmente es investigador titular del CEETA en la UCLV. Sus publicaciones abarcan temas de mecánica computacional y energía renovable.

Email: farinas@uclv.edu.cu

### **Yanelys Delgado Triana**

Es licenciada en Derecho por la Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2001. Especialista en Derecho Civil, de Familia y Patrimonial (MSc), por la Universidad Central de las Villas, 2007. Doctora en Ciencias Jurídicas por la Universidad de La Habana, 2007. Curso Especializado en Derechos Humanos, Instituto Interamericano de Derechos Humanos, Costa Rica, 2005. Tiene un postdoctorado por la Universidad Pompeu Fabra, 2008-2009.

Ha trabajado en importantes proyectos de investigación, tales como coordinadora del Proyecto ECOIURE Cuba-Canadá, en Villa Clara. 2005-2013; jefa del Proyecto del Decano Los Derechos de la Personalidad. 2004-2007; Jefa del Proyecto CITMA

DIPEM. 2006-2008. Fue miembro del Proyecto CITMA Comercio Electrónico, 2009-2011, entre otros proyectos.

Ha publicado varios libros, entre los que destacan *Energía renovable* (2009); *La educación ambiental en Cuba. Impacto del proyecto ECOIURE*; coatora de *Panorama de la ciencia del derecho en Cuba. Estudios en homenaje al profesor Julio Fernández Bulté* (2009); *Energía renovable: El derecho a un medio ambiente sano* (2011). *Protección en el ordenamiento jurídico cubano de los derechos inherentes a la personalidad en la esfera moral* (2008), entre otros.

Email: yanelysdt@uclv.edu.cu

**Recibido:** 11/01/2013

**Aprobado:** 02/02/2013