

UNA FORMULACIÓN AERO-ELECTRO-MECÁNICA PARA MODELAR AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL URBANOS CON UN MOTOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES

AN AERO-ELECTRO-MECHANICAL FORMULATION FOR MODELING URBAN VERTICAL-AXIS WIND TURBINES WITH A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Tomás Bellido^a y José M. Ramírez^{a,b}

^a*Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP), Universidad Tecnológica Nacional FRBB
(UTN), 11 de Abril 461, 8000 Bahía Blanca, Argentina*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

Palabras clave: Aerogeneradores de eje vertical, dinámica de fluidos computacional, generador síncrono de imanes permanentes, OpenFOAM.

Resumen. En este trabajo, se presenta una formulación acoplada para simular en forma simultánea la fluido-dinámica de un aerogenerador vertical y la dinámica eléctrica de un motor síncrono de imanes permanentes. La formulación matemática se realizó acoplando las ecuaciones de Navier-Stokes a un modelo electrodinámico de una máquina síncrona de imanes permanentes. Se realizaron simulaciones numéricas y se estudió la influencia del sistema eléctrico sobre el comportamiento aerodinámico para condiciones de auto-arranque y régimen estacionario. La fricción mecánica y las fuerzas magnéticas del generador eléctrico fue considerada. A partir de los resultados numéricos obtenidos, se predice que la potencia de salida obtenida a partir de un modelo sin acoplamiento aero-eléctrico-mecánico es sobrestimada en comparación con los resultados obtenidos de la formulación acoplada propuesta.

Keywords: Vertical wind turbines, CFD, permanent magnet synchronous machine, OpenFOAM.

Abstract In this work, a coupled formulation is presented to simultaneously simulate the fluid dynamics of a vertical-axis wind turbine and the electrical dynamics of a permanent magnet synchronous motor. The mathematical formulation was accomplished by coupling the Navier-Stokes equations with an electrodynamic model of a permanent magnet synchronous machine. Numerical simulations were performed, and the influence of the electrical system on aerodynamic behavior was studied for self-starting and steady-state conditions. The mechanical friction and magnetic forces from the electrical generator were considered. Based on the numerical results obtained, it is predicted that the power output obtained from a model without aero-electro-mechanical coupling is overestimated compared to the results obtained from the proposed coupled formulation.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el calentamiento global, el aumento de la demanda de energía y el agotamiento de los recursos fósiles han impulsado un renovado interés en las fuentes de energía renovable como soluciones cruciales para el futuro sostenible. Entre estas fuentes de energía, la eólica, la solar y la biomasa han emergido como opciones viables. En este contexto, el enfoque en la conversión de energía eólica se ha vuelto particularmente relevante; la turbina eólica de eje vertical (VAWT) resulta una opción destacada, especialmente adecuada para aplicaciones urbanas. Ésta se destaca como una alternativa debido a que es mecánicamente más simple en comparación con su contraparte de eje horizontal (Toja-Silva et al., 2013; Simic et al., 2013; Rezaeiha et al., 2018). Además, de haber demostrado ser altamente eficiente, incluso en condiciones de viento inestables, sin requerir ajustes de su orientación.

A pesar del creciente interés en el diseño, desarrollo y modelación de máquinas eólicas, la mayoría de los trabajos de investigación se centran fundamentalmente en su comportamiento aerodinámico y mecánico (Simic et al., 2013; Daróczy et al., 2015). Estas investigaciones resultan valiosas para el entendimiento de su dinámica en diferentes escenarios de trabajo. Sin embargo, pasan por alto un aspecto fundamental de estos sistemas, que involucra la dinámica del generador eléctrico en interacción con el comportamiento fluido-dinámico de las palas de la turbina. En este contexto, abordar esta problemática mediante el desarrollo de una herramienta computacional capaz de acoplar el sistema fluido-dinámico y el sistema eléctrico del generador resulta relevante para contribuir al avance del desarrollo de las turbinas eólicas desde una perspectiva de estudio integral.

El estudio de generadores eólicos de eje vertical y las características de flujo han sido estudiadas de forma experimental, analítica y numérica. Se han implementado varias técnicas de modelación tales como modelos analíticos basados en ecuaciones simplificadas unidimensionales que requieren información previa al cálculo, tales como coeficientes de sustentación y arrastre en las secciones del perfil aerodinámico. Sin embargo, se ha demostrado que estos modelos tienen dificultades para predecir con precisión el rendimiento de las VAWT con alta o baja relación de solidez y además, no consideran la interacción entre palas (Arab et al., 2017). En este contexto, el enfoque de la dinámica computacional de fluidos (CFD) se ha convertido en una herramienta de gran interés a la hora de analizar, diseñar y optimizar los VAWT. Esto se debe a que el método proporciona información detallada de las características del flujo aerodinámico en el aerogenerador. Por otro lado, el uso de este enfoque como método de cálculo involucra una fracción del costo en comparación con ensayos experimentales (Mannion et al., 2018).

En cuanto al generador eléctrico, es un componente importante en un aerogenerador ya que convierte la energía mecánica en eléctrica. Por lo que introducir el acoplamiento del generador eléctrico al modelo computacional aerodinámico de la turbina es muy importante a la hora de evaluar la potencia de salida (Li et al., 2016; Ramírez y Saravia, 2021). Muchos investigadores han considerado las fuerzas resistivas generadas por la máquina eléctrica mediante un modelo de amortiguación viscosa. Ramirez et al. (Ramírez y Saravia, 2021) han investigado la idoneidad del modelo de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (del inglés, RANS) para predecir la respuesta dinámica en el proceso de puesta en marcha y de régimen estacionario de VAWT Darrieus de pequeña escala. Los autores han implementado fuerzas resistivas que actúan sobre el rotor para modelar la fricción mecánica y las fuerzas magnéticas del generador eléctrico. El modelo supone que el par magneto-mecánico es proporcional a la posición angular y la velocidad del rotor y se condensan en un único coeficiente c_R . Los artículos previamente citados no abordan la multifísica que existe entre la dinámica de la máquina eléctrica trifásica y la di-

námica del flujo en el aerogenerador mediante el uso de un modelo aerodinámico CFD. Por lo tanto, en este trabajo se considera la influencia del sistema eléctrico sobre el comportamiento aerodinámico de la máquina a través del acoplamiento aero-electro-mecánico. Se modela una máquina síncrona de imanes permanentes (MSIP, o del inglés PMSG) debido a su simplicidad y por ser el más implementado en aerogeneradores modernos comparado con su contraparte, un generador de inducción convencional. El acoplamiento aero-electro-mecánico se manifiesta a través del torque electromecánico, el cual se origina por la interacción entre el campo magnético de los imanes permanentes del rotor del generador eléctrico y la corriente que circula por el bobinado del estator (Saravia, 2019). Esta corriente depende de los parámetros de carga eléctrica; es decir, la resistencia, la inductancia y la capacitancia. Su modelación se realizará mediante un enfoque 1D, el cual se implementará en el modelo computacional mediante la programación en Python. De esta manera, el sistema eléctrico y el sistema aerodinámico están acoplados, y su implementación y estudio será uno de los aportes fundamentales de este artículo. El artículo está organizado de la siguiente manera: Después de la introducción, en la sección 2 se presentan los aspectos de diseño de un VAWT urbano de baja potencia. La sección 3 presenta la configuración de las simulaciones numéricas tanto del VAWT como de la MSIP. La sección 4 contiene los resultados numéricos obtenidos. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones.

2. ASPECTOS DE DISEÑO DE UNA VAWT URBANA

Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) diseñadas para entornos urbanos enfrentan un desafío significativo debido a la naturaleza cambiante tanto de la magnitud como de la dirección del viento. Aunque la variabilidad en la dirección del viento no afecta el funcionamiento de la turbina, las fluctuaciones en la magnitud del viento tienen un impacto sustancial. Las turbinas de pequeña escala, que son comunes en entornos urbanos, se caracterizan por su ligereza y su necesidad de operar a altas RPM (revoluciones por minuto). Los rotores de estas turbinas poseen baja inercia y, por lo tanto, se aceleran rápidamente. El análisis se enfocará en los VAWTs urbanos de pequeña escala del estilo Darrieus, tal como se aprecia en la Figura 1.

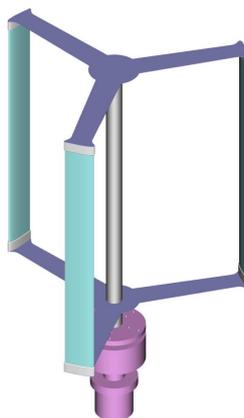


Figura 1: Diseño de un VAWT urbano.

En diseños urbanos, normalmente se utilizan un conjunto de parámetros que están limitados entre los valores presentados en la Tabla 1 (Rezaeiha et al., 2018). La velocidad de entrada es de 10 m/s y se calcula tomando una media de las medidas tomadas experimentalmente en varias localidades urbanas (Ramírez y Saravia, 2021).

Parámetro	Valor
Palas	3
Radio	[0.2, 0.4] m
Altura	[0.5, 1.0] m
Longitud de cuerda de la pala (c)	[0.05, 0.10] m
Sección de la pala	NACA 0012, NACA 0018
Punto de montaje de la pala	$c/2$

Tabla 1: Parámetros geométricos de un VAWT urbano.

3. MODELADO COMPUTACIONAL EN OPENFOAM

Los elementos críticos en el proceso de modelado abarcan la generación de la malla computacional y la configuración del solucionador. En esta sección, se exponen las elecciones típicas que se deben realizar para llevar a cabo la modelización en dos dimensiones de VAWT urbanos mediante el empleo del método RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). En este contexto, se opta por utilizar el modelo de turbulencia SST $k - \omega$, ampliamente reconocido y empleado en la literatura científica (Lohry y Martinelli, 2016).

3.1. Discretización del dominio

OpenFOAM emplea el método de volumen finito para llevar a cabo la discretización del dominio. El proceso de discretización comienza con la subdivisión del dominio computacional de VAWT en dos regiones circulares distintas: una región rotativa que abarca las palas del rotor y una región estática que engloba el entorno al rotor (*farfield*).

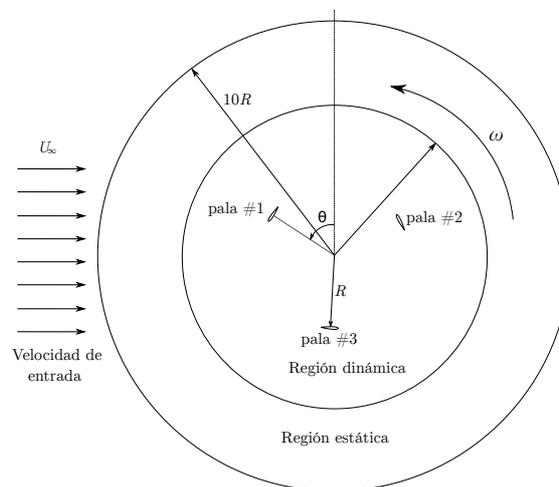


Figura 2: Dominio computacional.

Para obtener resultados precisos, es de suma importancia utilizar una malla computacional de alta calidad. Esto implica mantener una densidad cuidadosamente controlada en áreas específicas y asegurar una transición gradual en el tamaño de las celdas entre estas áreas y el dominio de flujo libre. En el caso de VAWT, una técnica de mallado ampliamente reconocida es el enfoque conocido como malla tipo O (ver Figuras 3 y 4). Esta elección permite minimizar la asimetría de las celdas cercanas a la pared, lo que conduce a una rápida convergencia cuando se utilizan esquemas de discretización de alto orden, al mismo tiempo que evita relaciones de

aspecto elevadas en las celdas.

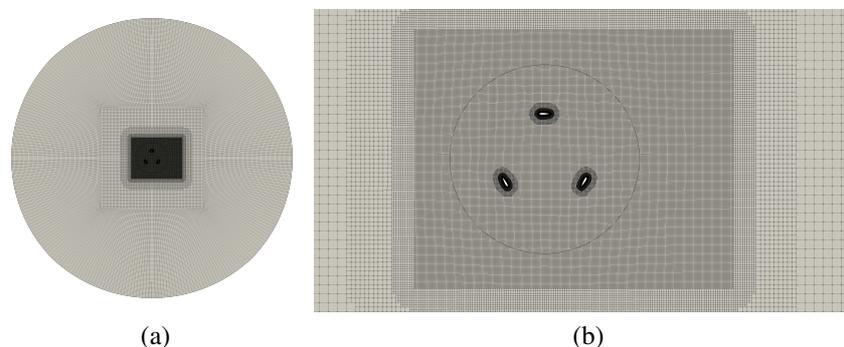


Figura 3: (a) Vista general de la malla computacional. (b) Vista detallada de la malla estática y dinámica.

Para determinar en forma precisa las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las palas, la calidad de la malla en la capa límite desempeña un papel crítico. Se pueden seguir dos enfoques para capturar la dinámica de la capa límite: (i) el modelado de la función de la pared y (ii) la resolución directa a través de una malla refinada de la capa límite (*del inglés, BL*). Es ampliamente documentado que la resolución de la capa límite proporciona resultados más precisos para los coeficientes aerodinámicos (Ghasemian et al., 2017). En el presente estudio, se ha optado por resolver directamente la capa límite. Por lo tanto, hemos definido el tamaño de las celdas cercanas a la pared de manera que la distancia adimensional a la pared, conocida como y^+ sea menor que 1. Es importante recordar que y^+ se calcula como $y^+ = \frac{u^* y}{\nu}$, donde u^* representa la velocidad de fricción definida como $u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$, donde τ_w es el esfuerzo cortante de la pared, y ν es la viscosidad cinemática del aire. También es una práctica recomendada utilizar una relación de expansión de 1.2 y un espesor total de capa δ de 0,02 de la cuerda de la pala. En la Figura 4 se puede apreciar la malla de una de las palas.

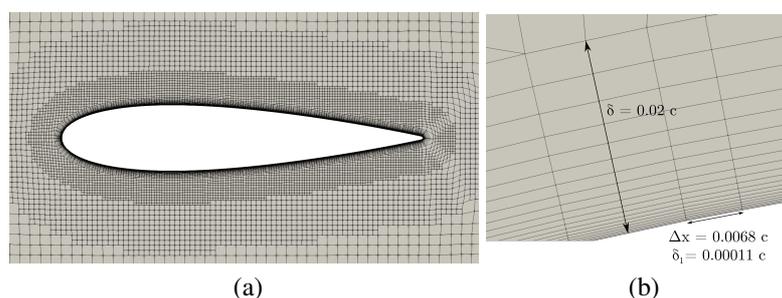


Figura 4: (a) Vista en detalle de la malla en el borde de ataque y de fuga de la pala. (b) Vista detallada de la malla BL.

3.2. Solucionador

3.2.1. OpenFOAM solver

La caracterización del volumen finito, que abarca las interacciones entre el rotor y el flujo, se puede llevar a cabo mediante diversas formulaciones. Entre las opciones disponibles en Open-

FOAM, se encuentran dos enfoques principales: el uso de volúmenes inmóviles en un marco de referencia rotativo y la aplicación de volúmenes móviles en un marco de referencia inercial. En el presente trabajo, se opta por la segunda alternativa. OpenFOAM puede abordar eficazmente el problema del flujo transitorio que interactúa con sólidos en movimiento a través del solucionador `pimpleFoam`. `pimpleFoam` combina los solucionadores PISO (Operador de división implícita de presión) y SIMPLE (Método semi-implícito para ecuaciones ligadas a presión) y se basa en una descripción arbitraria lagrangiana-euleriana (ALE), para donde los equilibrios de masa y momento están dados por:

$$\oint_{\partial\Omega} \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS = 0 \quad (1)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{F}_c - \mathbf{F}_s) dS = \int_{\Omega} \rho \mathbf{g} d\Omega. \quad (2)$$

donde \mathbf{u} es la velocidad del fluido, ρ es la densidad del fluido, $\hat{\mathbf{n}}$ es el vector unitario normal a la superficie y \mathbf{g} es el vector de gravedad. Las fuerzas convectivas y tensiones son

$$\mathbf{F}_c = \rho \hat{\mathbf{n}} \cdot [\mathbf{u} \otimes (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s)] \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_s = \hat{\mathbf{n}} \cdot (-p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}) \quad (4)$$

siendo \mathbf{u}_s la velocidad de la malla móvil, p la presión y $\boldsymbol{\tau}$ el tensor de tensiones viscosas.

Para el problema en cuestión es posible asumir un flujo Newtoniano incompresible, el tensor de tensiones está dado por:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (5)$$

siendo μ la viscosidad del aire.

3.2.2. Dinámica del rotor

El dominio se divide en una zona interior móvil y una zona estática exterior, que están en contacto a través de una interfaz. A través de esta interfaz, se asignan campos; OpenFOAM automatiza el proceso de mapeo a través de la llamada condición de límite de interfaz de malla arbitraria (AMI). Dado que no se tiene en cuenta la flexibilidad del rotor, la zona interior sufre un movimiento de cuerpo rígido. La velocidad \mathbf{u}_s en la Ec. (6) es el resultado de su rotación rígida alrededor del eje del rotor; entonces, la posición de la malla se obtiene integrando numéricamente un conjunto de 6 ODEs (Ordinary differential equation) de segundo orden y luego teniendo en cuenta la relación cinemática:

$$\mathbf{u}_s = \dot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\boldsymbol{\Lambda}} \mathbf{r} \quad (6)$$

donde \mathbf{x}_0 es el centro de rotación, $\boldsymbol{\Lambda}$ es el tensor de rotación y \mathbf{r} es la posición relativa de un punto de la malla respecto al centro de rotación.

OpenFOAM puede resolver el movimiento del rotor mediante un modelo de seis grados de libertad que parametriza rotaciones finitas con cuaterniones; el modelo se implementa en la biblioteca "`sixDoFRigidBodyMotion`". Sin embargo, este modelo no incluye el efecto de las fuerzas resistivas generadas por el motor eléctrico. Por lo tanto, en este artículo, se desarrolló e implementó un algoritmo que puede tener en cuenta las fuerzas resistivas electromecánicas generadas por un motor trifásico.

3.2.3. Modelación del motor eléctrico trifásico

En el eje de la turbina eólica, se origina un torque resistente como consecuencia de la incorporación de un generador eléctrico trifásico. La magnitud de este torque electromecánico se encuentra principalmente condicionada por las corrientes presentes en el estator y el flujo generado por los imanes del rotor.

El modelo que describe el comportamiento de una MSIP se aborda a través de una formulación electrodinámica simplificada. Las variables eléctricas tales como la tensión, la corriente y el flujo del estator son descritas en un marco de referencia dq que se sincroniza con el ángulo del rotor (Clarke, 1943; Park, 1929). Es importante destacar que existen modelos de un MSIP formulados en diversos marcos de referencias; sin embargo, el sistema dinámico bajo el marco de referencia utilizado en este trabajo resulta mas apropiado debido a que simplifica el desarrollo de las ecuaciones al independizarse del ángulo de posición y los ejes de fase. El sistema se resuelve mediante el método de integración robusto (Runge Kutta de cuarto orden) con un paso de integración seteado del solucionador `pimpleFoam`. El modelo dinámico de la máquina síncrona de imanes permanentes en el marco de referencia dq , queda:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{r_s}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}i_q\omega_r + \frac{V_d}{L_d} \quad (7)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{r_s}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}i_d\omega_r - \frac{\lambda_m}{L_q} + \frac{V_q}{L_q} \quad (8)$$

$$\omega_r = P\dot{\theta} \quad (9)$$

El par electromagnético de la MSIP queda expresado de la siguiente manera:

$$T_e = \frac{3P}{2} [(L_d - L_q) i_d i_q + \lambda_m i_q] \quad (10)$$

donde r_s es la resistencia del devanado en el estator, L_q y L_d son las inductancias de magnetización equivalentes de las bobinas en el marco de referencia d y q respectivamente. i_d e i_q y, V_d y V_q son las corrientes del estator y voltajes correspondientes al estator. P es el número de pares de polos y, ω_r es la velocidad del generador, que es igual al producto entre la velocidad angular del rotor y el número de pares de polos. λ_m es el flujo máximo generado por el imán montado en el rotor.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección, se presentan los resultados numéricos obtenidos mediante la simulación de un aerogenerador de eje vertical (VAWT) de tipo urbano, sometido a una corriente de aire constante de 10 m/s. Estas simulaciones abarcaron desde el proceso de auto-arranque de la VAWT hasta alcanzar una condición estacionaria estable. Para representar el perfil aerodinámico de la VAWT en estas simulaciones, se empleó el perfil NACA 0012, el cual es ampliamente utilizado en aerogeneradores urbanos. Se evaluaron dos configuraciones del modelo computacional que describe el comportamiento de la turbina. Por un lado, se llevaron a cabo simulaciones utilizando un modelo que considera tanto la aerodinámica de la turbina como las fuerzas de resistencia mecánica generadas por el rotor. Por otro lado, se ejecutaron simulaciones numéricas basadas en la formulación aero-electro-mecánica.

4.1. Escenarios de trabajo

En la Figura 5, se presenta la evolución de la velocidad de la punta de la pala del rotor, conocida como TSR por sus siglas en inglés, en función del tiempo. En esta representación, es evidente una fase inicial en la que la turbina está en reposo, y el movimiento rotativo se inicia cuando las fuerzas generadas en las palas debido al flujo de fluido superan las fuerzas de fricción del rotor (C_R) y las generadas por el motor eléctrico. La velocidad aumenta gradualmente hasta llegar a un punto de estabilización, momento en el cual el rotor inicia una rotación constante. Estos resultados respaldan el comportamiento previamente anticipado de la turbina, que abarca desde su auto-arranque hasta alcanzar finalmente su velocidad máxima de rotación, lo que corresponde a un estado estacionario.

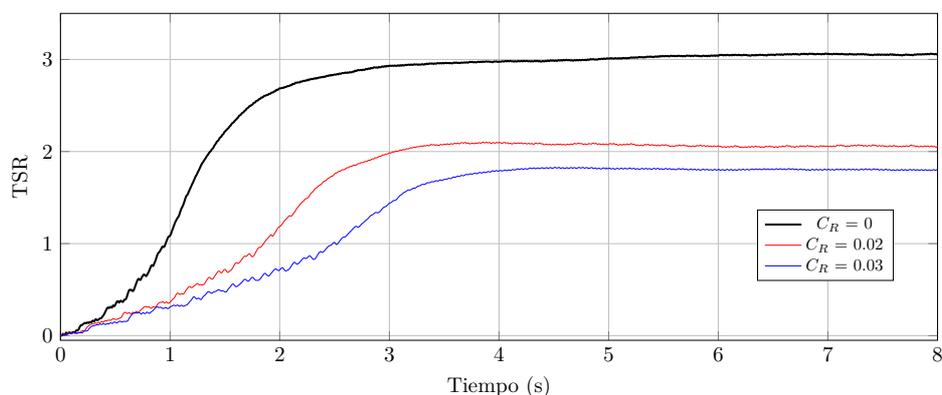


Figura 5: Velocidad de la punta de la pala (TSR) en función del tiempo.

4.2. Influencia sobre el torque resistivo

Los parámetros típicos de un motor eléctrico usado en una turbina urbana se describen en la Tabla 2. En la Figura 6, se presenta el torque resistivo expresado en Nm de los dos modelos computacionales mencionados anteriormente; uno de ellos considerando sólo las fuerzas resistivas mecánicas y otro teniendo en cuenta las fuerzas resistivas mecánicas y electromagnéticas.

Parámetro	Valor
Inductancia L_q	6.73 mH
Inductancia L_d	6.73 mH
Pares de polos	4
Flujos	0.319 Wb
Frecuencia del motor	60 Hz
Resistencia	2.6 Ω

Tabla 2: Parámetros eléctricos de un MSIP.

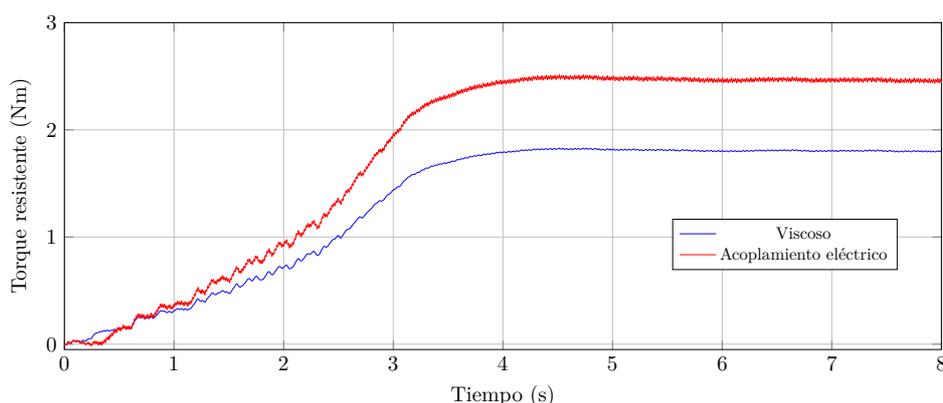


Figura 6: Torque resistente en función del tiempo.

Es importante el hecho de que la interacción de las fuerzas resistivas tanto mecánicas como electromagnéticas juegan un papel importante en la determinación de la potencia generada de la turbina. Con esta evaluación, es posible juzgar la importancia de considerar la dinámica eléctrica acoplado al modelo computacional aerodinámico. Se puede observar que el torque resistivo considerando sólo la fuerza de rozamiento del rotor alcanza un valor máximo de 1.8 Nm para una condición de trabajo estacionaria de la turbina. Mientras que el modelo computacional que considera tanto el par mecánico como el electromagnético se establece en un máximo de 2.5 Nm. Estas diferencias tienen un papel importante en la estimación de la producción de energía tanto en las capacidades de arranque automático como en condición estacionaria de los VAWT urbanos.

5. CONCLUSIÓN

En este artículo, se ha desarrollado e implementado computacionalmente un modelo acoplado que aborda simultáneamente tanto la aerodinámica de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) como la dinámica eléctrica de un motor síncrono de imanes permanentes. La influencia del sistema eléctrico sobre el comportamiento aerodinámico de la máquina se manifiesta a través de un acoplamiento aero-electro-mecánico. Este acoplamiento aero-electro-mecánico surge debido a la interacción entre el campo magnético generado por los imanes permanentes del rotor del generador eléctrico y la corriente eléctrica que fluye a través del bobinado del estator. La magnitud de esta corriente depende de parámetros eléctricos como la resistencia, la inductancia y la capacitancia. La modelización de esta interacción se llevó a cabo mediante un enfoque de una dimensión (1D), el cual se implementó en el modelo computacional utilizando el lenguaje de programación Python. Se simuló varios escenarios de trabajo de una configuración típica de una turbina eólica, desde auto-arranque hasta condición estacionaria. Se determinó la velocidad de la punta de la pala, TSR, en función del tiempo. Además, se determinó el torque resistivo en función del tiempo para diferentes modelos computacionales. Por un lado, teniendo en cuenta sólo fuerzas resistivas mecánicas y por otro lado, considerando fuerzas resistivas mecánicas y electromagnéticas. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que la incorporación de la máquina eléctrica al modelo aerodinámico juega un papel primordial a la hora de estimar la potencia generada de VAWTs.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y la Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

- Arab A., Javadi M., Anbarsooz M., y Moghiman M. A numerical study on the aerodynamic performance and the self-starting characteristics of a Darrieus wind turbine considering its moment of inertia. *Renewable Energy*, 107:298–311, 2017. ISSN 18790682. doi:10.1016/j.renene.2017.02.013.
- Clarke E. *Circuit Analysis of A-C Power Systems: Symmetrical and Related Components*. número v. 1 En *Circuit Analysis of A-C Power Systems*. Wiley, 1943.
- Daróczy L., Janiga G., Petrasch K., Webner M., y Thévenin D. Comparative analysis of turbulence models for the aerodynamic simulation of H-Darrieus rotors. *Energy*, 90:680–690, 2015. ISSN 03605442. doi:10.1016/j.energy.2015.07.102.
- Ghasemian M., Ashrafi Z.N., y Sedaghat A. A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 149:87–100, 2017. ISSN 01968904. doi:10.1016/j.enconman.2017.07.016.
- Li C., Zhou Y., Lim T.C., y Sun G. Dynamic responses of a wind turbine drivetrain under turbulent wind and voltage disturbance conditions. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(5):1687814016649936, 2016. doi:10.1177/1687814016649936.
- Lohry M.W. y Martinelli L. Unsteady reynolds-averaged navier-stokes simulation of cross-flow rotors, scaling, and blockage effects. *AIAA Journal*, 54(12):3828–3839, 2016. ISSN 00011452. doi:10.2514/1.J055069.
- Mannion B., Leen S.B., y Nash S. A two and three-dimensional CFD investigation into performance prediction and wake characterisation of a vertical axis turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(3), 2018. ISSN 19417012. doi:10.1063/1.5017827.
- Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48:716–727, 1929.
- Ramírez J. y Saravia C. Assessment of reynolds-averaged navier-stokes method for modeling the start-up regime of a darrieus rotor. *Physics of Fluids*, 33, 2021. doi:10.1063/5.0045083.
- Rezaeiha A., Montazeri H., y Blocken B. Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades. *Energy*, 165:1129–1148, 2018. ISSN 03605442. doi:10.1016/j.energy.2018.09.192.
- Saravia C.M. On the electromechanical coupling in electromagnetic vibration energy harvesters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, páginas In-Press, 2019.
- Simic Z., Havelka J.G., y Bozicevic Vrhovcak M. Small wind turbines - A unique segment of the wind power market. *Renewable Energy*, 50:1027–1036, 2013. ISSN 09601481. doi:10.1016/j.renene.2012.08.038.
- Toja-Silva F., Colmenar-Santos A., y Castro-Gil M. Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions - Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24:364–378, 2013. ISSN 13640321. doi:10.1016/j.rser.2013.03.052.