

Sintonización de controladores Pareto-óptimo aplicados a una turbina de viento para generación de energía

CARRILLO-AHUMADA, J. *†, AGUIRRE-CRUZ, A., GARCÍA-MUÑOZ, M.A. y REYNOSO-MEZA, G.

Universidad del Papaloapan. Circuito Central 200, colonia Parque Industrial, Tuxtepec, Oaxaca, 68301 México.

*Industrial and Systems Engineering Graduate Program (PPGEPS), Pontificia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Rua Imaculada Conceição, 1155, Zip Code 80215-901 Curitiba, PR, Brazil.

Recibido Octubre 3, 2016; Aceptado Noviembre 4, 2016

Resumen

El objetivo principal del presente artículo es la sintonización de controladores Pareto-óptimos para el control de la velocidad de rotación de una turbina de viento mediante optimización multi-objetivo y herramientas de decisión. El problema de optimización es planteado mediante la minimización de índices de desempeño para el seguimiento, rechazo de disturbio y robustez. El algoritmo de optimización para resolver el problema planteado fue el spMODE y se utilizaron frentes de Pareto para visualización de los controladores potenciales. Los controladores elegidos fueron evaluados mediante simulación numérica los cuales tiene diferentes prestaciones conforme a los índices de desempeño. Se tiene por lo tanto con esta metodología un conjunto de controladores Pareto-óptimos con diferentes grados de desempeño pueden ser elegidos conforme a los requerimientos operativos.

Turbinas de viento, control automático, optimización multiobjetivo

Abstract

The main aim of this article is the tuning of Pareto-optimal controllers for the rotational speed control of a wind turbine using multi-objective optimization and decision tools. The optimization problem is statement by minimizing of performance indices for tracking, disturbance rejection and robustness. The optimization algorithms to solve the statement problem was spMODE and Pareto fronts for visualization of potential controllers. The selected controllers were evaluated by numerical simulation which has different trade-off with respect to the performance indices. Therefore, with this methodology a set of Pareto-optimal controllers with different degrees of performance can be chosen according to operational requirements.

Wind turbines, automatic control, optimization, multi-objective

Citación: CARRILLO-AHUMADA, J., AGUIRRE-CRUZ, A., GARCÍA-MUÑOZ, M.A. y REYNOSO-MEZA, G. Sintonización de controladores Pareto-óptimo aplicados a una turbina de viento para generación de energía. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-9: 14-23

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jcarrillo@unpa.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

Actualmente, debido a la necesidad de consumo de energía para uso doméstico, transporte e industria ha causado un gran incremento en el consumo de combustibles fósiles y por lo tanto un inevitable aumento de los precios de la energía y de emisión de contaminantes. Debido a estos aspectos económicos y ambientales muchos países han preferido producir electricidad desde una fuente de energía renovable como la eólica, geotérmica, hidroeléctrica, biomasa entre otras. Específicamente entre las fuentes de energía renovable la eólica ha sido considerada la más efectiva [1] en el caso de México según MexicoWindPower la inversión realizada a la fecha en parques eólicos supera los 6,000 millones de dólares (mdd) con más de 1,400 aerogeneradores operando en el país y entre el año 2015 y el 2018 se estiman inversiones superiores a los 12,000 mdd. Entre los estados que generan más megavatios (Mw) con energía eólica son: Oaxaca con 5,564 Mw, Tamaulipas con 1350 Mw, Coahuila con 1,080 Mw, Nuevo León con 642 Mw y Jalisco con 399 Mw.

Para la producción de energía eólica una pieza fundamental son las turbinas de viento. Las turbinas de viento son sistemas complejos con grandes estructuras flexibles que operan bajo condiciones de turbulencia, impredecibles y en muchos casos en condiciones ambientales extremas por estas características son considerados *benchmarks*. Este tipo de sistemas, deben de adaptarse a los cambios ambientales y por lo tanto las estrategias de control tienen un impacto significativo en su fiabilidad, disponibilidad y eficiencia [2].

Se han propuesto diferentes metodologías de control a este sistema como son controladores convencionales, robustos, metodologías *soft-computing*, híbridos, de máximo poder de punto de seguimiento y controladores lado máquina, para los lectores interesados en estos tipos de controladores pueden consultar en [5] una revisión bibliográfica de avances recientes. Otra forma para establecer el diseño, control y costo [6-10] ha sido por medio de metodología de optimización multi-objetivo. Específicamente, la optimización multi-objetivo [11] cuando es empleada para el ajuste de controladores permite un grado de involucramiento diferente del diseñador en la selección del controlador deseado para lo cual se pueden utilizar herramientas de visualización como los diagramas de nivel [12], frentes de Pareto [13,14] o bien herramientas de ranqueo como Promethee utilizada por [15].

El diseño mediante optimización multi-objetivo involucra tres etapas: definición del problema, aproximación del frente de Pareto y selección de la solución a implementar. Esa selección se hace con base al conjunto de soluciones Pareto óptimas calculadas, donde es posible analizar el intercambio de prestaciones entre soluciones, y a partir de ellos, seleccionar la solución más conveniente. Por lo tanto dependiendo de las preferencias del diseñador se tendrán controladores que puedan ser factibles al sistema. La metodología y algoritmos de optimización propuestos por Reynoso-Meza ha sido utilizada en sistemas multivariados [16-18] útiles para la industria aeronáutica, química y de manufactura proporcionando resultados satisfactorios.

El objetivo principal del presente artículo es la sintonización de controladores Pareto-óptimos para el control de la velocidad de rotación de una turbina de viento mediante optimización multi-objetivo y herramientas de decisión. La estructura del artículo es la siguiente: en la Sección 2 se presentan los preliminares en la optimización multi-objetivo y del proceso de optimización, en la Sección 3 se muestra el caso de estudio y la estructura de control propuesta. Los resultados del ajuste, decisión y aplicación de controladores se discuten en la Sección 4 y finalmente las conclusiones del trabajo.

Marco Teórico

Preliminares en la optimización multi-objetivo

El planteamiento del problema de optimización multi-objetivo [11] puede ser definido sin perder generalidad de la siguiente forma:

$$J(\theta) = [J_1(\theta), \dots, J_m(\theta)] \in R^m \quad (1)$$

$$\min_{\theta \in R^n}$$

Sujeto a:

$$g(\theta) \leq 0$$

$$h(\theta) \leq 0$$

$$\underline{\theta}_i \leq \theta_i \leq \bar{\theta}_i \quad i = [1, \dots, n]$$

Donde $\theta \in R^n$ es definido como el vector de decisión, $J(\theta) \in R^m$ como el vector objetivo y $g(\theta)$ y $h(\theta)$ como el vector de restricciones de desigualdad e igualdad respectivamente; $\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i$ son los límites inferior y superior en el espacio de decisión.

No existe una única solución porque en general no hay una solución que sea la mejor para todos los objetivos. Por lo tanto, un conjunto de soluciones son definidas en el conjunto de Pareto. Cada solución en el conjunto de Pareto define un vector objetivo en el frente de Pareto. Todas las soluciones en el frente de Pareto se dice que son un conjunto de soluciones Pareto-óptimas no dominadas. El procedimiento de diseño por medio de optimización multi-objetivo consiste al menos de tres etapas principales [19]: 1) planteamiento del problema multiobjetivo (del inglés MOP), 2) proceso de optimización multiobjetivo (del inglés MOO) y 3) etapa de decisión multi-criterio (del inglés MCDM).

Etapas MOP

En esta etapa, el diseñador debe decidir cuál es el concepto de diseño que será utilizada para enfrentar el problema de resolver, que se puede medir para obtener el desempeño de una alternativa de diseño y cuáles soluciones son pertinentes, prácticas o factibles. En el caso del control de turbinas de viento las soluciones obtenidas se refieren a las ganancias del controlador.

Etapas proceso MOO

En esta etapa, el algoritmo de optimización multi-objetivo es implementado en el anteriormente definido problema de optimización. Para lo cual se utilizó el algoritmo spMODE propuesto por [16-18].

Etapas MCDM

Finalmente, con el frente de Pareto aproximado, el diseñador podrá valorar las alternativas de diseño y sus prestaciones entre los objetivos que se encuentran en conflicto.

Esto es llevado a cabo para seleccionar una solución en la cual se prefiere que se encuentre balanceado el problema. Para esta etapa herramientas de visualización son altamente valoradas por el diseñador especialmente cuando se trata de cuatro o más objetivos. Revisiones bibliográficas sobre esta etapa son descritas por [20,21,15].

Preliminares en el proceso de optimización

Un sistema de control en lazo cerrado puede ser establecido de la siguiente forma:

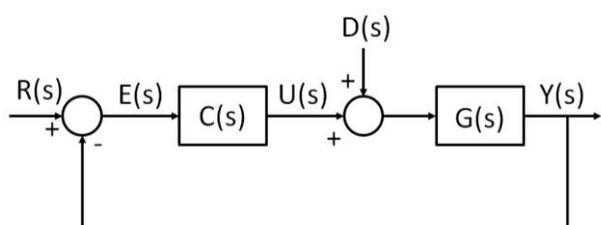


Figura 1 Estructura básica de un sistema de control en lazo cerrado.

Donde $R(s)$ es el setpoint, $E(s)$ es error, $C(s)$ es el controlador, $U(s)$ es la señal de control, $G(s)$ es la planta del sistema, $D(s)$ es la entrada de disturbio e $Y(s)$ es la salida medida. Las funciones de transferencia desde las entradas a las salidas son las siguientes:

$$T_{yr} = GC(I + GC)^{-1} \quad (2)$$

$$T_{yd} = G(I + CG)^{-1} \quad (3)$$

$$T_{ur} = C(I + GC)^{-1} \quad (4)$$

$$T_{ud} = -CG(I + CG)^{-1} \quad (5)$$

La respuesta de estas funciones de transferencia ec. (2)-(5) con una entrada tipo escalón pueden evaluar al la salida y la señal de control ante cambios en el setpoint y de entradas de disturbio, por lo tanto los siguientes índices de desempeño y robustez son utilizados como funciones objetivo:

- Integral del cuadrado del error $\left(\int_0^T e(t)^2 dt\right)$ ante una entrada tipo escalón del setpoint (ISE_{servo}) e Integral del cuadrado de la acción de control $\left(\int_0^T u(t)^2 dt\right)$ ante una entrada tipo escalón del setpoint (ISU_{servo}):

$$I_{servo} = ISE_{servo} + ISU_{servo} \quad (6)$$

- Integral del cuadrado del error $\left(\int_0^T e(t)^2 dt\right)$ ante una entrada tipo escalón del disturbio (ISE_{reg}) e Integral del cuadrado de la acción de control $\left(\int_0^T u(t)^2 dt\right)$ ante una entrada tipo escalón del disturbio (ISU_{reg}):

$$I_{reg} = ISE_{reg} + ISU_{reg} \quad (7)$$

- Tiempo de asentamiento (ST), considerando un ancho de banda del 2%.
- Para considerar las situaciones de compromiso entre requerimientos a baja y alta frecuencias se utiliza la sensibilidad mixta que consiste en la sensibilidad y la sensibilidad al control

$$I_{robustez} = \left\| \begin{matrix} (I + GC)^{-1} \\ C(I + GC)^{-1} \end{matrix} \right\|_{\infty} \quad (8)$$

La cual puede ser interpretada como un objetivo de diseño para el desempeño nominal, seguimiento, atenuación de disturbio, y estabilización robusta.

El método de sintonización puede ser planteado como el siguiente problema de optimización multiobjetivo: encontrar las ganancias del controlador C (descrito en la ec. (9)) con:

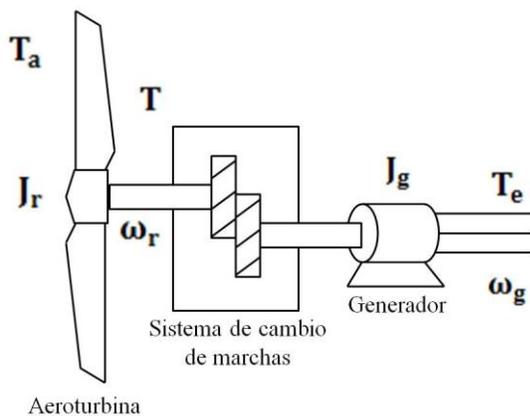
$$\min J \quad (8)$$

Donde las restricciones y la pertinencia de la función objetivo depende de la estructura de control.

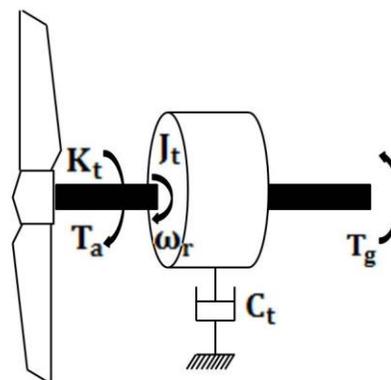
Caso de estudio y estructuras de control propuesta

Turbina de viento

Las turbinas de viento son utilizadas para convertir la energía del viento en energía eléctrica. La energía mecánica obtenida desde la energía cinética del viento es convertida en energía eléctrica mediante el generador. En [3] se realiza la siguiente descripción del sistema: La turbina de viento y el generador eléctrico de energía son conectados mediante un sistema de cambios de marchas (el cual incrementa la velocidad de salida y decrementa el torque). Como se observa en la Figura 2, en presencia de la entrada de torque aerodinámico (T_a) el motor de la turbina de viento se acciona a la velocidad angular (ω_r). El sistema de cambios de marchas funciona para transmitir la salida de torque (T_p) en el generador donde el es el eje de torsión (T_e) a una velocidad angular (ω_g) es producido.



(a)



(b)

Figura 2 (a) Esquema del sistema turbina de viento-generador, (b) su equivalente a un-grado-de-libertad [3,22].

Complementando la Figura 2, se tienen las siguientes ecuaciones adicionales:

$$J_t = J_r + Y^2 J_g \quad (10)$$

$$C_t = C_r + Y^2 C_g \quad (11)$$

$$K_t = K_r + Y^2 K_g \quad (12)$$

$$Y = \frac{\omega_g}{\omega_r} \quad (13)$$

Donde J es el momento de inercia, C es el amortiguamiento, K es el eje de resistencia a la torsión, Y es la relación de transmisión, ω es la velocidad angular; y los subíndices r y g se refieren a los componentes del rotor y generador respectivamente. Por lo tanto, se puede obtener un modelo lineal en función de transferencia [3]:

$$G(s) = \frac{\omega_r(s)}{U(s)} = \frac{s}{J_t s^2 + C_t s + K_t} \quad (14)$$

Con los siguientes valores nominales: $J_t = 16 \text{ kg m}^2$, $C_t = 52 \text{ [adim]}$ y $K_t = 52 \text{ [adim]}$.

Control proporcional integral derivativo con un integrador (PIDInt)

Se considera un controlador proporcional integral derivativo (PID) de la forma:

$$C(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) = \frac{\xi s^2 + \eta s + \delta}{s} \quad (15)$$

Donde $\xi = k_p \tau_d$, $\eta = k_p$, $\delta = k_p / \tau_i$, k_p es la ganancia proporcional, τ_i es el tiempo integral y τ_d es el tiempo derivativo. En [3] se propone un controlador proporcional integral derivativo con un integrador (PIDInt) obtenido de la ec. (8) con un integrador:

$$C(s) = \frac{\xi s^2 + \eta s + \delta}{s^2} \quad (16)$$

Los detalles del ajuste de la sintonización de esta estructura de control se presenta en la siguiente sección.

Resultados

Ajuste de controladores Pareto-óptimos

Las ganancias del controlador que sirvió de punto inicial en la sintonización de controladores son [3]: $k_d = \xi = 4.1$, $k_p = \eta = 10.2$, $k_i = \delta = 7.9$.

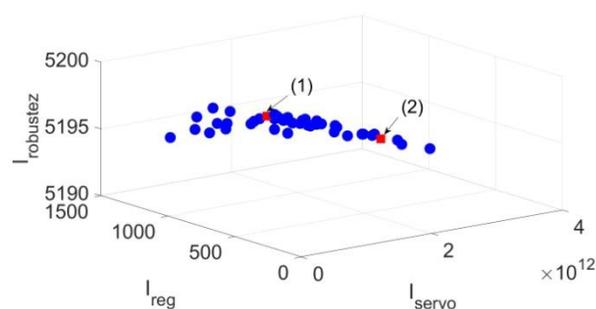
Para la sintonización de controladores un algoritmo evolutivo diferencial multi-objetivo con poda esférica (del inglés sp-MODE) es utilizado el cual ha sido propuesto por [16-18]. La función objetivo es descrita de la siguiente forma:

$$J \in \mathbb{R}^3 = [I_{\text{servo}} \quad I_{\text{reg}} \quad I_{\text{robustez}}] \quad (9)$$

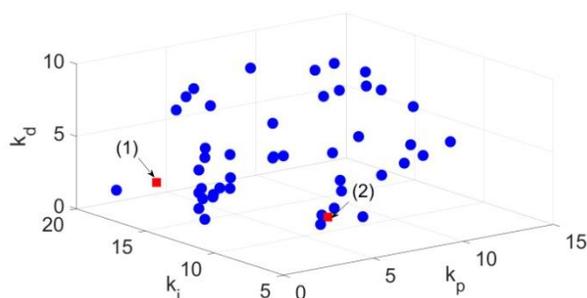
Sujeto a las siguientes variables de decisión $1 \leq k_p \leq 10$, $0.01 \leq k_i \leq 1$ y $1 \leq k_d \leq 50$; la pertinencia del vector de función objetivo es: $0 \leq I_{\text{servo}} \leq 2 \times 10^{12}$, $0 \leq I_{\text{reg}} \leq 1100$ $0 \leq I_{\text{robustez}} \leq 1.18 \times 10^4$,

Etapa de decisión

El frente y conjunto de Pareto (Figura 3) muestra los controladores potenciales obtenidos del proceso de optimización multiojetivo.



(a)



(b)

Figura 3 (a) Frente de Pareto, (b) conjunto de Pareto para la turbina de viento.

Para realizar un comparativo de los controladores generado en todo el espacio de decisión se seleccionaron dos controladores los cuales tienen prestaciones diferentes (mostrados en la Tabla 1).

El controlador (1) se encuentra con mayor compromiso para cambios en el servosistema, el controlador (2) se encuentra con mayor compromiso para rechazos de disturbio aunque los dos se tiene un comportamiento semejante ante variaciones de incertidumbre.

Control	Ganancias	Índices
1	$k_p = 4.1$ $k_i = 19.5$ $k_d = 1$	$I_{servo} = 1.6 \times 10^{11}$ $I_{reg} = 335.82$ $I_{robustez} = 5199.35$
2	$k_p = 6.3$ $k_i = 10$ $k_d = 1$	$I_{servo} = 2.74 \times 10^{11}$ $I_{reg} = 748.10$ $I_{robustez} = 5194.13$

Tabla 1 Índices de desempeño para los controladores seleccionados de la turbina de viento.

Aplicación

Se realizó la evaluación de los controladores elegidos ante cambios en el setpoint, rechazo de disturbio y robustez ante un cambio en el estado estacionario, para esto se utilizó el modelo lineal (ec. 16) con un tiempo de simulación de 50 s. En $t = 0$ se aplicó un cambio en el setpoint de 0 a 1, y en $t = 40$ se aplicó una entrada disturbio con valor de 1.

Además, para probar la robustez, se utilizaron los parámetros: $J_t = 20 \text{ kg m}^2$, $C_t = 65 \text{ [adim]}$ y $K_t = 65 \text{ [adim]}$ en la ecuación que describe la función de transferencia (ec. 14). Para las simulaciones numéricas se utilizó Simulink®.

En la Figura 4 se muestra el desempeño de los controladores elegidos en un punto nominal y con un cambio en el estado estacionario.

En el gráfico 1a, se observa que la salida del sistema (ω_r) el controlador (1) está más comprometido que el controlador (2) ya que el primero proporciona al sistema las siguientes características: tiempo de asentamiento en $t \leq 10$, rechazo de disturbio adecuado y robustez para un cambio en el punto de consigna a diferencia del controlador (2) que está más comprometido con rechazo de disturbio. Esta última característica, de rechazo de disturbio no es significativamente distinta entre controladores. Con respecto a la robustez del sistema, la diferencia no es significativa entre controladores ya que la dinámica es la misma ya sea en el punto de operación del que fueron sintonizados y el de variación. La figura 4b muestra la respuesta de la señal de control U con el controlador (1) se requiere de menor esfuerzo de control para obtener los requerimientos de seguimiento. Por lo tanto, de los tres índices el que tiene mayor importancia es I_{servo} y este requerimiento lo cubre el controlador (1).

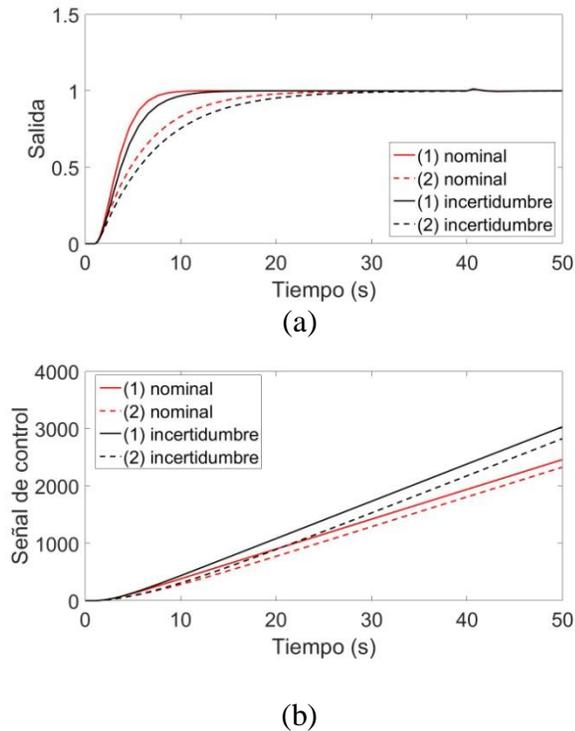


Gráfico 1 Desempeño de los controladores elegidos en un punto nominal e incertidumbre en el estado estacionario. (a) Respuesta de la salida, (b) señal de control del sistema.

Conclusiones

Se realizó la sintonización de controladores Pareto-óptimos para turbinas de viento, se observó que esta metodología de sintonización proporciona un conjunto de posibles controladores con diferentes prestaciones que pueden ser utilizados al sistema.

Agradecimiento

Al Prodep por el apoyo económico al proyecto "Optimización del método de secado en películas elaboradas por casting a base de almidón de plátano/reforzadas con nanofibras de celulosa (nfc)" en el rubro de Fortalecimiento de Cuerpos Académicos. G. Reynoso-Meza gratefully acknowledges the partial support provided by the postdoctoral fellowship BJT-304804/2014-2 from the National Council of Scientific and Technologic Development of Brazil (CNPq) for the development of this work.

Referencias

- [1] Sayigh, A. (1999). Renewable energy—the way forward. *Applied Energy*, 64(1), 15-30.
- [2] Kroll, A., & Schulte, H. (2014). Benchmark problems for nonlinear system identification and control using soft computing methods: need and overview. *Applied Soft Computing*, 25, 496-513.
- [3] Moradi, H., & Vossoughi, G. (2015). Robust control of the variable speed wind turbines in the presence of uncertainties: A comparison between H_∞ and PID controllers. *Energy*, 90, 1508-1521.
- [4] Inthamoussou, F. A., De Battista, H., & Mantz, R. J. (2016). LPV-based active power control of wind turbines covering the complete wind speed range. *Renewable Energy*, 99, 996-1007.
- [5] Tiwari, R., & Babu, N. R. (2016). Recent developments of control strategies for wind energy conversion system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 268-285.

- [6] Mortazavi, S. M., Soltani, M. R., & Motieyan, H. (2015). A Pareto optimal multi-objective optimization for a horizontal axis wind turbine blade airfoil sections utilizing exergy analysis and neural networks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 136, 62-72.
- [7] Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. L. (2008). Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems. *Renewable energy*, 33(12), 2559-2572.
- [8] Odgaard, P. F., Larsen, L. F., Wisniewski, R., & Hovgaard, T. G. (2016). On using pareto optimality to tune a linear model predictive controller for wind turbines. *Renewable Energy*, 87, 884-891.
- [9] Chehouri, A., Younes, R., Ilinca, A., & Perron, J. (2015). Review of performance optimization techniques applied to wind turbines. *Applied Energy*, 142, 361-388.
- [10] Soufi, Y., Kahla, S., & Bechouat, M. (2016). Feedback linearization control based particle swarm optimization for maximum power point tracking of wind turbine equipped by PMSG connected to the grid. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [11] Miettinen, K. (2012). *Nonlinear multiobjective optimization* (Vol. 12). Springer Science & Business Media.
- [12] Blasco, X., Herrero, J. M., Sanchis, J., & Martínez, M. (2008). A new graphical visualization of n-dimensional Pareto front for decision-making in multiobjective optimization. *Information Sciences*, 178(20), 3908-3924.
- [13] Carrillo-Ahumada, J., Rodríguez-Jimenes, G. C., & García-Alvarado, M. A. (2011). Tuning optimal-robust linear MIMO controllers of chemical reactors by using Pareto optimality. *Chemical engineering journal*, 174(1), 357-367.
- [14] Carrillo-Ahumada, J., Reynoso-Meza, G., García-Nieto, S., Sanchis, J., & García-Alvarado, M. A. (2015). Sintonización de controladores Pareto-óptimo robustos para sistemas multivariables. Aplicación en un helicóptero de 2 grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(2), 177-188
- [15] Rodríguez-Mariano, A., Reynoso-Meza, G., Páramo-Calderón, D. E., Chávez-Conde, E., García-Alvarado, M. A., & Carrillo-Ahumada, J. (2015). Análisis del desempeño de controladores lineales sintonizados en diferentes estados estacionarios del biorreactor de Cholette mediante técnicas de decisión multi-criterio. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(1), 167-204.
- [16] Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., & Herrero, J. M. (2012). Multiobjective evolutionary algorithms for multivariable PI controller design. *Expert Systems with Applications*, 39(9), 7895-7907.
- [17] Reynoso-Meza, G., Blasco, X., Sanchis, J., & Herrero, J. M. (2013). Comparison of design concepts in multi-criteria decision-making using level diagrams. *Information Sciences*, 221, 124-141.
- [18] Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., & García-Nieto, S. (2014). Physical programming for preference driven evolutionary multi-objective optimization. *Applied Soft Computing*, 24, 341-362.

[19] Coello, C. C. A, Van, V., David, A., & Lamont, G.B. (2002). Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. *Springer*, 242.

[20] Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European journal of Operational research*, 200(1), 198-215.

[21] Tutar, T., & Filipic, B. (2015). Visualization of Pareto front approximations in evolutionary multiobjective optimization: a critical review and the projection method. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 19(2), 228-245.

[22] Song, Y. D., Dhinakaran, B., & Bao, X. Y. (2000). Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(3), 293-308.

[23] Gu, D. W., Petkov, P., & Konstantinov, M. M. (2005). *Robust control design with MATLAB®*. Springer Science & Business Media.