

Modelo difuso de predicción de energía en parques eólicos

Ignacio Fernández Sánchez-Pascuala



Universidad Complutense Madrid & Universidad Politécnica Madrid

22 de abril de 2024

- 1 Introducción
- 2 Modelado de una planta eólica
 - Potencia de una planta eólica
 - Modelo predicción potencia turbina eólica
 - Modelo de predicción de la potencia de una planta eólica
- 3 Detalles Implementación
- 4 Resultados
- 5 Conclusión
- 6 Referencias

- Importancia energía eólica
- **Predicción de energía:**
 - Integración en red eléctrica
 - Control precios del mercado respecto oferta y demanda
 - Activación de plantas auxiliares
- **Problema:** Fluctuación del viento => Modelo de predicción a corto plazo (30 min, 1 h, 2 h)
- FCM + Sistema de inferencia borroso => Conjunto de reglas IF-THEN

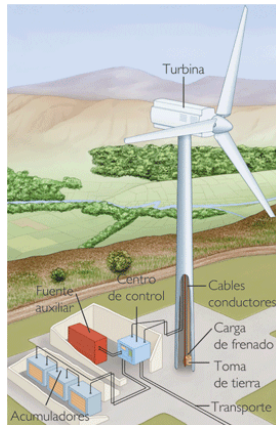


Figura: Funcionamiento turbina

1 Introducción

2 Modelado de una planta eólica

- Potencia de una planta eólica
- Modelo predicción potencia turbina eólica
- Modelo de predicción de la potencia de una planta eólica

3 Detalles Implementación

4 Resultados

5 Conclusión

6 Referencias

- Potencia de salida de una planta eólica \Rightarrow Energía cinética del viento capturada por las turbinas eólicas.
- La energía eólica se puede calcular utilizando la fórmula:

$$E = \frac{1}{2}mv^2(J)$$

- La potencia del viento se puede derivar de la energía cinética del viento utilizando:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 (W)$$

donde ρ es la densidad del aire (en kg/m^3), A es el área barrida por las palas del rotor (en m^2).

- **Límite de Betz:** Una turbina eólica no puede aprovechar más de un 59.3 % de la energía cinética del viento.
- Potencia máxima limitada por:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot 0,593$$

- Esto se debe a la conservación de la masa y del momento de inercia del flujo de aire.

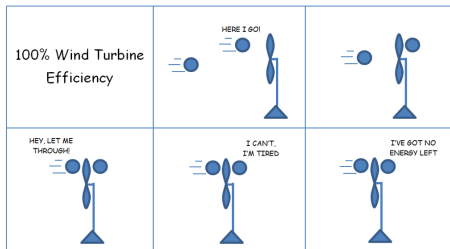
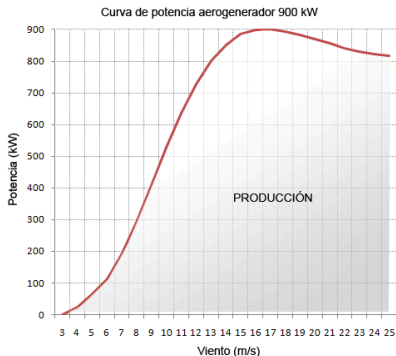


Figura: Caricatura de 2 moléculas de aire

- **Factores principales:** Velocidad del viento y la temperatura del aire.
- La rugosidad del suelo también influye.
- En la práctica, 75 % a un 80 % del límite de Betz.
- Aerogeneradores modernos: Velocidades del viento que varían entre 3 y 25 m/s (velocidad de conexión y de corte).
- Curva de potencia del fabricante:



- Modelo difuso basado en datos para pronosticar la energía eólica generada por una turbina.
- **Datos de entrada:** sistema SCADA + producción histórica energía EMS.
 - Velocidad del aire: $v(n), v(n-1), \dots$
 - Temperatura del aire: $t(n), t(n-1), \dots$
 - Producción de energía eólica: $p(n), p(n-1), \dots$
- **Salida modelo:** Producción energía eólica en el siguiente instante $p(n+1)$.

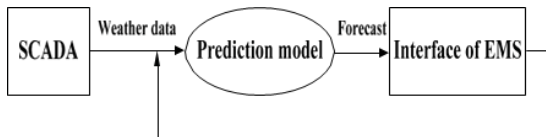


Figura: Mapa esquemático flujo de datos

- Modelo difuso \Rightarrow Conjunto de reglas en la forma IF-THEN para describir las relaciones de entrada-salida del modelo de predicción.
- **Regla difusa:**

R_i : IF x_1 is A_{i1} and x_2 is A_{i2} and ... and x_s is A_{is} THEN $y_i = z_i(x)$

donde $x = (x_1, x_2, \dots, x_s)$ son variables lingüísticas, A_{ij} son conjuntos difusos, R_i representa la i -ésima regla, y_i es la salida de la i -ésima regla.

- **Modelos Difusos:**

- Takagi-Sugeno (TS): $z_i = b_{i0} + \sum_{j=1}^s b_{ij}x_j$
- Mamdani (TS orden 0): $z_i = b_i$

- **Función de pertenencia:**

$$u_{ij}(x_j) = \exp \left(-\frac{(x_j - a_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2} \right)$$

donde a_{ij} y σ_{ij} son el centro y la anchura de la j -ésima función de pertenencia en la i -ésima regla.

- **Relación entrada-salida:**

$$y = \sum_{i=1}^p z_i \left[\prod_{j=1}^s u_{ij}(x_j) \right] / \sum_{i=1}^p \left[\prod_{j=1}^s u_{ij}(x_j) \right]$$

donde $u_{ij}(x_j)$ denota la función de pertenencia de x_j a la i -ésima regla.

- Algoritmo de agrupamiento modificado Fuzzy C-Means (FCM).
- **Objetivo:**

$$\text{Minimizar } J_m = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik}^m(\mathbf{x}) \|\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i\|^2, \quad 1 < m < \infty$$

donde:

- m : Exponente difuso.
- \mathbf{v}_i : Centro del i -ésimo clúster.
- u_{ik} : Grado de pertenencia del k -ésimo dato al i -ésimo clúster.

- **Restricciones Problema de Optimización:**

$$v_i, \quad u_{ik} \in U$$

$$0 < \sum_{i=1}^n u_{ik} < n \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, c$$

$$\sum_{k=1}^c u_{ik} = 1 \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, n$$

- .
- Algoritmo **FCM**: Optimización iterativa de J_m en el espacio de producto de variables de entrada-salida.

● Criterios de Validación del Número de Clústeres (c):

① Índice XB (*Xie & Beny*)

$$V_{XB}(U, c) = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \|x_j - v_i\|^2}{n \cdot \min_{i \neq j} \|v_i - v_j\|^2}$$

② Índice VT (*Tang*)

$$VT(U, c) = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \|x_j - v_i\|^2 + \frac{1}{c(c+1)} \sum_{i=1}^c \sum_{k=1, k \neq i}^c \|v_i - v_k\|^2}{\min_{i \neq j} \|v_i - v_j\|^2 + \frac{1}{c}}$$

Se busca el valor de c que minimice estos índices.

- **Centros de los clústeres de salida:**

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{is}, v_{is+1}), \quad i = 1, 2, \dots, c.$$

Sea $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{is})$ y $z_i = v_{is+1}$.

a_i : Centro i -ésima partición difusa en el espacio de entrada.

z_i : Centro i -ésima partición difusa en el espacio de salida.

- **Modelo difuso final:**

$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \dots \text{ and } x_s \text{ is } A_{is} \text{ THEN } y_i \text{ is } z_i,$

para $i = 1, 2, \dots, c$

donde A_{ij} denota la función de pertenencia gaussiana centrada en a_{ij} , $a_{ij} \in a$, y z_i es la salida de la i -ésima regla del modelo.

- **Optimización parámetros σ_{ij} :** Algoritmo genético (GA) para minimizar la raíz el error cuadrático medio (RMSE).

- Parques eólicos: Varias turbinas eólicas.
- Producción energía = suma de la potencia de cada turbina.
- Otros modelos (RNNs, ARIMAs, NWP, mapas de viento...)

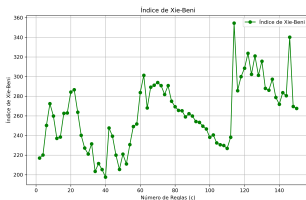
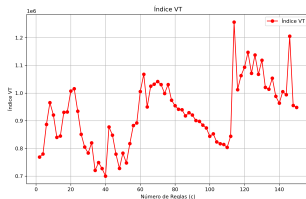


- 1 Introducción
- 2 Modelado de una planta eólica
 - Potencia de una planta eólica
 - Modelo predicción potencia turbina eólica
 - Modelo de predicción de la potencia de una planta eólica
- 3 Detalles Implementación**
- 4 Resultados
- 5 Conclusión
- 6 Referencias

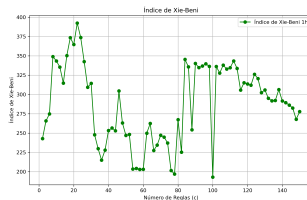
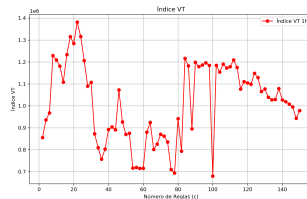
- Datos reales de Mayo de 2022 de la planta Berrybank en Australia proporcionados por Naturgy GPG.
- **Datos** = mediciones cada 10 minutos de temperatura, velocidad del viento y energía producida (SCADA y EMS).
- Uso 3 intervalos anteriores para la predicción. Intervalos de 30 minutos y 1 hora.
- Prueba con 1 turbina aleatoria.
- Filtrado solo datos disponibles (funcionamiento correcto turbina).
- Uso librerías scikit-fuzzy (FCM) y pymoo (GA).
- Separación datos 80 % primeros días (entrenamiento) y el 20 % siguientes (test).

- 1 Introducción
- 2 Modelado de una planta eólica
 - Potencia de una planta eólica
 - Modelo predicción potencia turbina eólica
 - Modelo de predicción de la potencia de una planta eólica
- 3 Detalles Implementación
- 4 Resultados**
- 5 Conclusión
- 6 Referencias

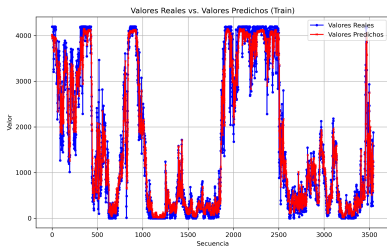
30 Minutos



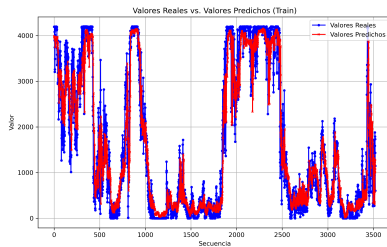
1 Hora



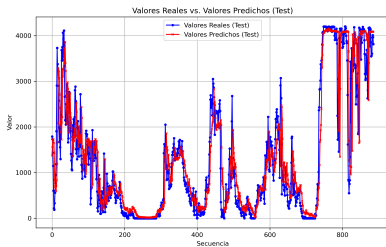
30 Minutos



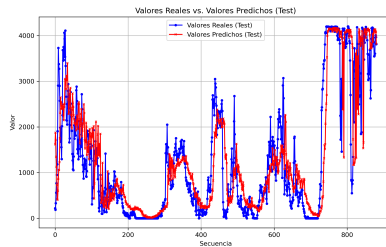
1 Hora



30 Minutos



1 Hora



Intervalo	Entrenamiento	Test
30 Min	387.22	551.27
1 Hora	483.56	695.35

- 1 Introducción
- 2 Modelado de una planta eólica
 - Potencia de una planta eólica
 - Modelo predicción potencia turbina eólica
 - Modelo de predicción de la potencia de una planta eólica
- 3 Detalles Implementación
- 4 Resultados
- 5 Conclusión**
- 6 Referencias

- Aplicación exitosa del modelo difuso basado en datos históricos de un parque eólico.
- Menor error de predicción con un período de 30 minutos.
- Estructura interpretable y útil para la descripción cualitativa del sistema de predicción.
- **Posibles Mejoras modelo:**
 - Factores como la dirección del viento y la humedad.
 - Probar Clustering sustractivo.
 - Paralelizar el algoritmo genético.
 - Uso de más datos del histórico para entrenar.
 - Validación para evitar sobreajuste.
 - Takagi-Sugeno.

- 1 Introducción
- 2 Modelado de una planta eólica
 - Potencia de una planta eólica
 - Modelo predicción potencia turbina eólica
 - Modelo de predicción de la potencia de una planta eólica
- 3 Detalles Implementación
- 4 Resultados
- 5 Conclusión
- 6 Referencias

- “A prediction model for wind farm power generation based on fuzzy modeling” presentado en la *2011 International Conference on Environmental Science and Engineering (ICESE2011)* por Bo Zhu, Min-you Chen, Neal Wade, y Li Ran.
- “A novel clustering validity function of FCM clustering algorithm.” *IEEE Access* 7 (2019): 152289-152315 por Zhu, Ling-Feng, Jie-Sheng Wang, y HY Wang.

¡Gracias por su atención!