Control híbrido HCS-Fuzzy por par electromagnético para un sistema eólico PMSG bajo transitorios condicionados por una base de datos real

HCS-Fuzzy Torque-Based MPPT Control for a PMSG Wind Energy Conversion System under Transients Conditioned by a Real Database

Omar Cruz Bárcenas, Jesús Rooney Rivera Guillén*
Facultad de Ingeniería, Maestría en Mecatrónica, Universidad Autónoma de Querétaro, México. jesus.rooney.rivera@uaq.mx*

Resumen

La potencia entregada por un aerogenerador de velocidad variable cambia con la velocidad del viento *y* con la condición de operación del rotor. Por ello, el seguimiento del punto de máxima potencia, o MPPT, ajusta en tiempo real la carga eléctrica del generador para capturar la mayor cantidad posible de energía. Los métodos MPPT incluyen estrategias indirectas, que requieren información previa de la turbina, métodos directos basados en señales medidas, *y* estrategias inteligentes o híbridas que buscan mejorar la respuesta transitoria. Los métodos directos no requieren conocer con exactitud la curva aerodinámica de la turbina; sin embargo, mantienen un compromiso entre rapidez de seguimiento *y* oscilación alrededor del punto de máxima potencia. Este trabajo propone un controlador MPPT híbrido con búsqueda directa por par electromagnético para un sistema eólico con generador síncrono de imanes permanentes, o PMSG. El método conserva la búsqueda por ascenso de colina, o HCS, como acción base *y* añade una corrección temporal mediante un sistema de inferencia difusa, o FIS, cuando la variación de la velocidad del viento indica un transitorio rápido. La corrección se limita *y*, cuando se cumplen las condiciones de activación, se bloquea temporalmente ante caídas abruptas de potencia. El controlador se comparó con perturbación *y* observación, o P&O, HCS *y* un controlador difuso bajo la misma planta de 1.5 MW, límites de actuación *y* diez perfiles transitorios diseñados a partir de una serie meteorológica de viento. La energía eléctrica neta, incluyendo intervalos de potencia negativa, fue la métrica de comparación. El híbrido incrementó el resultado energético agregado en 99.66 % respecto a P&O, 39.73 % respecto a HCS *y* 35.17 % respecto al controlador difuso. Aunque no obtuvo el mejor resultado en todos los perfiles, presentó el mayor balance energético del conjunto evaluado.

Abstract

The power delivered by a variable-speed wind turbine changes with wind speed and rotor operating conditions. Therefore, maximum power point tracking (MPPT) adjusts the electrical loading of the generator in real time to capture the greatest possible amount of energy. MPPT methods include indirect strategies, which require prior turbine information, direct methods based on measured signals, and intelligent or hybrid strategies intended to improve transient response. Direct methods do not require an exact aerodynamic curve of the turbine; however, they retain a trade-off between tracking speed and oscillation around the maximum power point. This work proposes a hybrid electromagnetic-torque MPPT controller with a direct-search base for a wind energy system with a permanent-magnet synchronous generator (PMSG). The method retains hill-climb search (HCS) as the base action and adds a temporary correction through a fuzzy inference system (FIS) when wind-speed variation indicates a rapid transient. The correction is bounded and temporarily blocked during abrupt power drops when its activation conditions are satisfied. The controller was compared with perturb-and-observe (P&O), HCS, and a fuzzy controller using the same 1.5 MW plant, operating limits, and ten transient profiles constructed from a meteorological wind time series. Net electrical energy, including negative-power intervals, was used as the comparison metric. The hybrid controller improved the aggregate energy result by 99.66% over P&O, 39.73% over HCS, and 35.17% over the fuzzy controller. Although it did not achieve the best result in every profile, it delivered the highest energy balance across the evaluated set.

Palabras clave: generador síncrono de imanes permanentes; seguimiento del punto de máxima potencia; control híbrido; HCS; lógica difusa.

Introducción

En un aerogenerador de velocidad variable, la potencia eléctrica entregada no es constante: depende de la velocidad del viento *y* de la condición aerodinámica *y* mecánica del rotor. Para cada condición de viento existe un punto de operación en el que la turbina puede convertir la mayor cantidad posible de energía disponible. Si el sistema opera lejos de ese punto, una fracción del recurso eólico no se aprovecha. Por ello, el seguimiento del punto de máxima potencia, conocido como maximum power point tracking (MPPT), ajusta la carga eléctrica solicitada al generador para mantener la operación cerca de la condición de máxima extracción mientras el viento cambia.

La evolución de los sistemas de conversión eólica ha llevado de leyes de control basadas en curvas características conocidas de la turbina a estrategias MPPT que ajustan el punto de operación en tiempo real. Las revisiones recientes clasifican estos métodos en técnicas indirectas, directas, inteligentes e híbridas. La elección depende de la información disponible de la turbina, la complejidad computacional admisible, las señales medidas *y* la dinámica de viento considerada (Mousa *et al*., 2021; Pande *et al*., 2021; Teklehaimanot *et al*., 2024; Banerjee & Maity, 2025).

Los métodos indirectos emplean parámetros aerodinámicos, relaciones de velocidad de punta o curvas óptimas de potencia *y* par. En contraste, los métodos directos buscan el máximo a partir de señales medidas. Entre ellos, la perturbación *y* observación (P&O) *y* la búsqueda por ascenso de colina (HCS) son ampliamente utilizados por su simplicidad *y* porque no requieren conocer con exactitud la curva aerodinámica de la turbina. Ambos modifican la variable de mando *y* observan el cambio de potencia. Sin embargo, enfrentan un compromiso inherente: un paso de búsqueda grande acelera la respuesta, pero incrementa las oscilaciones alrededor del máximo; uno pequeño reduce las oscilaciones, pero puede retrasar el seguimiento ante cambios rápidos de viento (Gaied *et al*., 2022).

La lógica difusa se ha propuesto para reducir ese compromiso, ya que permite adaptar la acción de control mediante reglas asociadas al estado del sistema. Gouabi *et al*. (2023) aplicaron lógica difusa para adaptar el tamaño de perturbación de un controlador P&O; Dahmane *et al*. (2024) emplearon una estrategia similar en un sistema eólico con generador síncrono de imanes permanentes (PMSG); *y* Karthikeyan *y* Ramakrishnan (2024) presentaron una arquitectura híbrida difusa para un sistema PMSG conectado a red. Por otra parte, Javadi *y* Hazin (2014) combinaron HCS *y* lógica difusa para modificar el paso de actualización de la velocidad de referencia del rotor. Estos antecedentes muestran que la integración de búsqueda directa *y* lógica difusa puede mejorar la respuesta transitoria, aunque el resultado depende de la variable manipulada, la señal de retroalimentación, los límites del convertidor *y* las condiciones de validación. Otros trabajos recientes también comparan control difuso, P&O *y* técnicas de optimización en sistemas eólicos con generador síncrono de imanes permanentes, con resultados dependientes de la planta *y* del escenario de viento (Abdellatif *et al*., 2025; El Aissaoui *et al*., 2025; Nguyen *et al*., 2025).

En el presente trabajo se propone un controlador MPPT híbrido por par electromagnético para un sistema eólico PMSG. HCS utiliza la potencia activa para actualizar una referencia base de par, mientras que la lógica difusa pondera una corrección temporal activada por la variación del viento del perfil de ensayo. La propuesta se evalúa mediante simulación frente a P&O por par, HCS por par *y* un controlador difuso, con la misma planta, límites *y* perfiles. Su contribución consiste en separar la búsqueda base de una corrección acotada *y* protegida; en los diez ensayos evaluados, la mejora energética agregada frente al mejor comparador alternativo fue de 35.17 %.

Trabajo relacionado

Los antecedentes más próximos a la propuesta integran búsqueda directa *y* lógica difusa para adaptar la actuación durante cambios de viento. La comparación debe distinguir si la inferencia modifica el paso de búsqueda, la referencia de velocidad o una corrección adicional de par, así como las señales *y* restricciones empleadas (Gouabi *et al*., 2023; Dahmane *et al*., 2024; Karthikeyan *y* Ramakrishnan, 2024).

El antecedente más próximo es el método HCS-Fuzzy de Javadi *y* Hazin (2014), que conserva la búsqueda por ascenso de colina *y* emplea lógica difusa para variar el incremento de la velocidad de referencia del rotor. El presente trabajo se diferencia porque actúa directamente sobre el par electromagnético: HCS calcula el par base en cada ciclo *y* la lógica difusa sólo aporta una corrección temporal limitada cuando la variación del

viento lo justifica. Además, dentro de las condiciones de activación, una caída abrupta de potencia bloquea temporalmente la corrección. La comparación matemática se desarrolla en la metodología. En el plano de validación, también se han reportado evaluaciones mediante emulación y hardware-in-the-loop, que evidencian la importancia de comparar los controladores con condiciones de ensayo comunes (Debbabi *et al*., 2026).

Fundamento matemático

Potencia disponible y extracción aerodinámica

La potencia cinética disponible en el flujo *y* la potencia mecánica extraída por el rotor se expresan mediante la densidad del aire ρ, el área barrida *A*, la velocidad del viento *v y* el coeficiente de potencia C_p:

$$P_v = \tfrac{1}{2}\,\rho\,A\,v^3; \quad P_aero = \tfrac{1}{2}\,\rho\,A\,C_p(\lambda,\beta)\,v^3; \quad A = \pi R^2$$
(1)

En la ecuación (1), *P_v* es la potencia cinética del viento y *P_aero* la potencia mecánica extraída, ambas en vatios (W); ρ es la densidad del aire en kg/m³; *A* es el área barrida en m²; *v* es la velocidad del viento en m/s; y C_p es el coeficiente de potencia, adimensional. *R* es el radio del rotor en metros; λ es la razón de velocidad de punta, adimensional; ω_t es la velocidad angular del rotor en rad/s; y β es el ángulo de paso de las palas, expresado en grados en la curva aerodinámica de la planta.

La razón de velocidad de punta $\lambda = \omega_t R/v$ relaciona la velocidad angular del rotor ω_t, el radio *R y* la velocidad del viento *v*. La curva C_p implementada en la planta depende de λ *y* del ángulo de paso β. En consecuencia, el MPPT no modifica directamente el viento ni la turbina: ajusta la carga eléctrica solicitada al PMSG para desplazar el punto de operación hacia una condición aerodinámica favorable.

Balance mecánico y variable de mando

El balance dinámico del eje vincula el par aerodinámico de la turbina, la carga electromagnética del generador, la inercia equivalente *J y* el rozamiento viscoso *B*:

$$J\,d\omega_t/dt = T_aero - |T_em| - B\omega_t$$
(2)

En la ecuación (2), *T_aero* es el par aerodinámico, |*T_em*| es la magnitud positiva de la carga electromagnética, *J* es la inercia equivalente, *B* es el coeficiente de rozamiento viscoso *y* ω_t es la velocidad angular del eje. La magnitud de la carga se resta en el balance mecánico. En la interfaz de la planta, el par electromagnético firmado es negativo *y* se obtiene al cambiar el signo de la magnitud de referencia; de forma equivalente, el balance puede escribirse sumando ese par firmado. La planta utiliza límites de −1.00 a −0.20 en unidades por unidad (*p*.u.), un periodo MPPT de 0.1 s *y* un paso eléctrico de 5 µs.

Las magnitudes físicas de la ecuación (2) se expresan en unidades coherentes: los pares en N·m, *J* en kg·m², *B* en N·m·s/rad y el tiempo *t* en segundos. Los límites del controlador se expresan en p.u. respecto a la base de par de la planta, no en N·m; el balance mecánico y la referencia normalizada no deben mezclarse sin la conversión correspondiente.

Métrica energética

La comparación se fundamenta en la energía eléctrica neta obtenida de la potencia activa medida *P_activa*. La integración comienza en t = 2 s para excluir el arranque *y* mantiene los periodos de potencia negativa, ya que éstos reducen el balance eléctrico real:

$$E_el,neta = (1 / 3.6 \times 10^6) \int [t = 2\ s]\text{^}T\ P_activa(t)\ dt \quad [kWh]$$
(3)

La ganancia relativa de un controlador a respecto de b se calcula como $G_{a,\beta} = 100(E_a - E_\beta)/E_\beta$, donde *E* es la energía eléctrica neta. Esta medida compara la energía eléctrica neta de las ejecuciones realizadas con la

misma planta *y* el mismo perfil. No se interpreta como eficiencia MPPT absoluta ni como coeficiente aerodinámico C_p.

En la ecuación (3), *E_el,neta* es la energía eléctrica neta en kWh; *P_activa* es la potencia activa con signo en W; *t* es el tiempo de integración en segundos; y *T* es el tiempo final del ensayo, 15 s. El factor de conversión transforma W·s en kWh. En la ganancia relativa, *a* identifica el controlador evaluado, *b* el comparador y $G_{a,\beta}$ el cambio porcentual referido a la energía del comparador.

Metodología propuesta

La Figura 1 organiza el funcionamiento del controlador en tres etapas: preparar las señales, calcular el control *y* aplicar la referencia. El proceso se ejecuta cada 0.1 s mientras el ensayo permanece activo. La ley híbrida utiliza la potencia activa normalizada *y* el viento definido por el perfil de entrada; la velocidad del rotor está disponible en la plataforma, pero no interviene en los cálculos del script híbrido. Inicio *y* Fin delimitan la ejecución del ensayo: su finalización es una condición externa de la simulación *y* no una decisión adicional del MPPT. Los apartados siguientes describen las operaciones *y* condiciones de cada etapa.

Preparación de señales

En la primera etapa de la Figura 1 se toman la potencia activa y la velocidad del viento del perfil y se comprueba que ambas sean finitas. El término “señales utilizables” del diagrama se refiere a esa comprobación numérica. Si alguna no es finita, se conserva el par base anterior, se omite la corrección y se envía la referencia con el signo generador. Este caso no actualiza los filtros, la búsqueda HCS ni el contador de bloqueo. Con señales finitas se continúa con su acondicionamiento.

La potencia activa se normaliza respecto a la potencia nominal de la planta: *P_pu*(*k*)=*P_activa*(*k*)/(1.5×10⁶ W). Para la búsqueda se emplea *p*(*k*)=max[0,*P_pu*(*k*)], mientras que la señal original conserva su signo para la integración energética *y* la protección. El filtro de potencia se actualiza como *p_f*(*k*)=0.8p_f(*k*−1)+0.2p(*k*), *y* el incremento es *Δp_f*(*k*)=*p_f*(*k*)−*p_f*(*k*−1). La velocidad del viento *v_w* se toma del perfil de entrada; su derivada discreta es *d_v*(*k*)=[*v_w*(*k*)−*v_w*(*k*−1)]/*T_s*. La ecuación (4) filtra su magnitud para decidir si puede intervenir la corrección, con *T_s*=0.1 s.

En las expresiones discretas, *k* es el índice de muestreo, adimensional, y *T_s* es el periodo de actualización de 0.1 s. *P_pu* es la potencia activa normalizada; *p* es su parte no negativa; *p_f* es la potencia filtrada; y *Δp_f* es su cambio entre muestras, todos en p.u. *v_w* es el viento del perfil en m/s; *d_v* es su derivada discreta con signo; y *d_v,f* es la magnitud filtrada de esa derivada, ambas en m/s². Los coeficientes de los filtros son adimensionales.

$$d_v,f(k) \;=\; 0.65\; d_v,f(k-1) \;+\; 0.35\;|[v_w(k) \;-\; v_w(k-1)]\;/\;T_s| \tag{4}$$

Búsqueda HCS por par electromagnético

La segunda etapa de la Figura 1 comienza con la actualización del par base HCS a partir de la potencia filtrada. Esta actualización ocurre antes de consultar el bloqueo *y* la activación de la ayuda difusa, por lo que un bloqueo sólo anula la corrección adicional. La variable de mando es la magnitud del par electromagnético de referencia; la capa difusa no modifica la memoria ni el paso de búsqueda de HCS.

Si la potencia filtrada disminuye respecto al ciclo previo, HCS invierte el sentido de búsqueda; en caso contrario lo conserva. La ecuación (5) actualiza la magnitud de par con un paso fijo de 0.020 *p*.u., donde *m_HCS* es el par base, *d* toma los valores −1 o 1 *y* sat limita la salida entre 0.20 *y* 1.00 *p*.u. La inicialización utiliza *m_HCS*=0.40 *p*.u., *d*=1, paso HCS registrado=0.020 *p*.u., derivada filtrada=0 *y* contador de bloqueo=0; la potencia inicial filtrada es max[0,*P_pu*(0)] *y* la memoria del viento toma su primera muestra.

En las ecuaciones (5) y (7), *m_HCS* es la magnitud base de par, *m_ref* la magnitud final y *T_em,ref* la referencia firmada, todas en p.u. *d* es el sentido de búsqueda, adimensional; sat es la operación de saturación a los límites indicados. *c* es la corrección temporal de magnitud de par en p.u.; no es un cambio acumulado en la memoria de HCS.

$$m_HCS(k) \;=\; sat_[0.20, 1.00]\;\{m_HCS(k-1) \;+\; d(k)\;\cdot\;0.020\} \tag{5}$$

Corrección difusa y protección transitoria

Después de actualizar HCS, la segunda etapa comprueba primero el contador de bloqueo. Si está activo, se reduce una unidad *y* se conserva únicamente el par base. Si no hay bloqueo, se comprueba si la magnitud de la derivada filtrada del viento es mayor o igual que 0.35 m/s² *y* si la potencia filtrada supera 0.05 *p*.u. Estas dos condiciones corresponden a "cambio rápido de viento *y* potencia suficiente" en la Figura 1. Cuando no se cumplen, se mantiene HCS solo. Si se cumplen, se evalúa la protección por caída de potencia antes de calcular la ayuda difusa.

Cuando la protección permite la corrección, las entradas difusas se normalizan como *x*=sat_[−1,1](*Δp_f*/0.03) *y y*=sat_[−1,1](paso HCS calculado en el ciclo actual/0.020). La ecuación (6) define la corrección *c*, donde *d_v* es la derivada instantánea con signo *y w_FIS* es el peso obtenido mediante las reglas. La inferencia determina la intensidad de la corrección *y* el signo de la derivada determina su sentido: se reduce temporalmente la magnitud de carga con viento ascendente *y* se aumenta con viento descendente. Su amplitud está limitada por 0.003 *p*.u. La segunda entrada representa el paso solicitado después de actualizar el sentido de búsqueda en ese ciclo, no el paso aplicado en el ciclo anterior ni el cambio efectivo de par después de la saturación.

En la ecuación (6), sgn devuelve el signo de su argumento y min selecciona el menor valor. *w_FIS* es un peso adimensional entre 0.5 y 1. Las entradas *x* e *y* son adimensionales: sus divisores son 0.03 p.u. para el cambio de potencia y 0.020 p.u. para el paso de par. El límite de corrección es 0.003 p.u.; el coeficiente 0.0003 tiene unidades de p.u.·s²/m para convertir la derivada del viento en una corrección de par normalizada.

$$c(k) = -sgn[d_v(k)]\, min(0.003, 0.0003\,|d_v(k)|)\, w_FIS(k) \quad (6)$$

La Tabla 1 presenta la matriz de quince reglas definida en el código para ponderar la corrección de par. Las funciones de pertenencia son triangulares: para *x* se emplean centros −1, −0.5, 0, 0.5 *y* 1 *y* $\mu_i(x)$=max[0,1−|*x*−*centro_i*|/0.5]; para *y* se emplean centros −1, 0 *y* 1 *y* $v_j(y)$=max[0,1−|*y*−*centro_j*|]. Cada regla se activa mediante α_ij=min[μ_i,v_j]. Su salida constante *R_ij* se agrega mediante *z*=Σα_ij*R_ij*/Σα_ij. Si la suma de activaciones es menor que 10^{-9}, el nivel es cero; en otro caso se satura *z* entre −2 *y* 2 *y* se redondea al entero más próximo, con empates alejados de cero, como en MATLAB. Finalmente, *w_FIS*=0.5+0.5|nivel|/2. Las salidas de signo opuesto e igual magnitud producen el mismo peso. En el híbrido, el paso solicitado por HCS siempre es −0.020 o 0.020 *p*.u.; por ello, *y* sólo toma los valores −1 o 1 *y* las cinco reglas de la columna de paso nulo no se activan. Esa columna se conserva para documentar la matriz completa, no como una rama utilizada en los ensayos del híbrido. En los límites de par, la entrada sigue representando el paso solicitado aunque la saturación reduzca o anule el cambio efectivo.

En la inferencia, *i* y *j* identifican las funciones de pertenencia de las dos entradas; μ_i y v_j son grados de pertenencia entre cero y uno; α_ij es la activación de una regla; *R_ij* es su nivel de salida constante; y *z* es el promedio ponderado antes del redondeo. Estas cantidades y los centros de pertenencia son adimensionales. El contador de bloqueo expresa un número de ciclos, no una magnitud física.

Tabla 1. Base de reglas del sistema de inferencia difusa. Los niveles de salida se usan para ponderar la corrección temporal de par. En el híbrido sólo se activan las columnas de paso negativo y positivo.

Cambio de potencia filtrada	Paso HCS negativo	Paso HCS nulo	Paso HCS positivo
Muy negativo	−1	0	1
Negativo	2	−1	−2
Cercano a cero	−1	1	1
Positivo	−2	1	2
Muy positivo	−1	0	1

La decisión de protección de la Figura 1 comprueba si *Δp_f*<−0.12 *p*.u. o *P_pu*<−0.05 *p*.u., una vez satisfechas las condiciones de activación. La primera condición identifica una caída importante de potencia filtrada *y* la segunda una potencia instantánea negativa fuera del límite establecido. Si alguna se cumple, la corrección se anula *y* se carga un contador de diez ciclos. HCS continúa actualizándose mientras se descuenta el contador. El ciclo de detección también omite la corrección; la siguiente oportunidad de habilitarla aparece once periodos de muestreo después, si entonces se cumplen las condiciones de activación. En el diagrama, la rama de protección conduce a HCS solo, no a la aplicación de una ayuda difusa. Fuera de las condiciones de activación no se comprueban estos umbrales ni se inicia un nuevo bloqueo: la corrección ya permanece anulada. Se trata de una protección de la intervención adicional, no de una protección general de la planta ante cualquier caída de potencia.

En la tercera etapa de la Figura 1 se toma el par base *y* se añade la corrección únicamente si fue habilitada, como expresa la ecuación (7). Sin activación o durante el bloqueo, *c*(*k*)=0 *y* la referencia coincide con HCS. La magnitud se satura entre 0.20 *y* 1.00 *p*.u. *y* se envía con signo generador: *T_em,ref*(*k*)=−*m_ref*(*k*). La corrección pertenece al ciclo actual *y* no se integra en la memoria HCS. Después de aplicar la referencia, el ensayo continúa con una nueva adquisición o llega a Fin cuando termina la simulación.

$$m_ref(k) \;=\; sat_[0.20, 1.00]\,\{m_HCS(k) \;+\; c(k)\} \tag{7}$$

Diferencia matemática respecto al método HCS-Fuzzy de Javadi y Hazin

Javadi *y* Hazin (2014) utilizan una búsqueda basada en la velocidad de referencia del rotor. Su lógica difusa calcula un incremento variable a partir del cambio de potencia mecánica *y* del cambio de velocidad. La ecuación (8) es una representación resumida de esa arquitectura para compararla con la propuesta; no constituye una reproducción completa de sus reglas, escalas *y* lazos de control:

$$\omega_ref(k) \;=\; \omega_ref(k-1) \;+\; F_JH\;[\Delta P_m(k), \Delta\omega(k)] \tag{8}$$

En la ecuación (8), *ω_ref* es la velocidad de referencia, *ΔP_m* es el cambio de potencia mecánica, *Δω* es el cambio de velocidad del rotor *y F_JH* representa el incremento obtenido mediante la lógica difusa. El control de velocidad de la planta convierte posteriormente esa referencia en la acción eléctrica del generador. Esta expresión describe la diferencia de variable manipulada *y* no debe usarse por sí sola para reproducir el método original.

Las variables del esquema resumido de la ecuación (8) utilizan *ω_ref* y *Δω* en rad/s, *ΔP_m* en W y *F_JH* como incremento de velocidad en rad/s. Son unidades físicas para describir la arquitectura; las escalas y normalizaciones de una reproducción del método original deben tomarse de Javadi y Hazin (2014), no deducirse de este esquema.

En el método propuesto, HCS actualiza el par base en cada ciclo con señales finitas mediante la ecuación (5), *y* las ecuaciones (6) *y* (7) añaden una corrección temporal cuya intensidad depende del peso difuso *y* cuyo sentido depende de la derivada del viento. Las entradas de inferencia son el cambio de potencia filtrada *y* el paso HCS solicitado en el ciclo actual. La protección anula la corrección en las condiciones descritas, sin detener la búsqueda base. Así, el método requiere el viento del perfil para activar su acción adicional, aunque HCS no necesita una curva aerodinámica óptima almacenada.

La Tabla 2 resume las diferencias matemáticas *y* de arquitectura entre ambos métodos.

Tabla 2. Diferencias matemáticas y de arquitectura entre el método HCS-Fuzzy de Javadi y Hazin (2014) y el controlador propuesto.

Aspecto matemático	Javadi y Hazin (2014)	Método propuesto
Variable manipulada	Velocidad de referencia del rotor	Magnitud de par electromagnético de referencia

Entradas de la lógica difusa	Cambio de potencia mecánica y cambio de velocidad del rotor	Cambio de potencia filtrada y paso HCS solicitado en el ciclo actual; activación por variación de viento
Salida difusa	Paso variable para actualizar la velocidad de referencia	Peso que modula una corrección temporal de par; la derivada del viento determina su sentido y amplitud, con límite de 0.003 p.u.
Relación con HCS	El ajuste HCS de velocidad se sustituye por un paso difuso variable	HCS permanece como ley base; la salida difusa no altera su estado

Funcionamiento del MPPT híbrido

Como se observa en la Figura 1, las decisiones de la segunda etapa seleccionan entre HCS solo *y* HCS con una corrección temporal; todas las rutas con señales finitas convergen en la aplicación de la referencia. La ruta de señal no utilizable conserva *y* envía el par base anterior. Esta organización separa el acondicionamiento de señales, la búsqueda con protección *y* la aplicación de la referencia, *y* muestra tanto el retorno al siguiente ciclo como el cierre del ensayo.

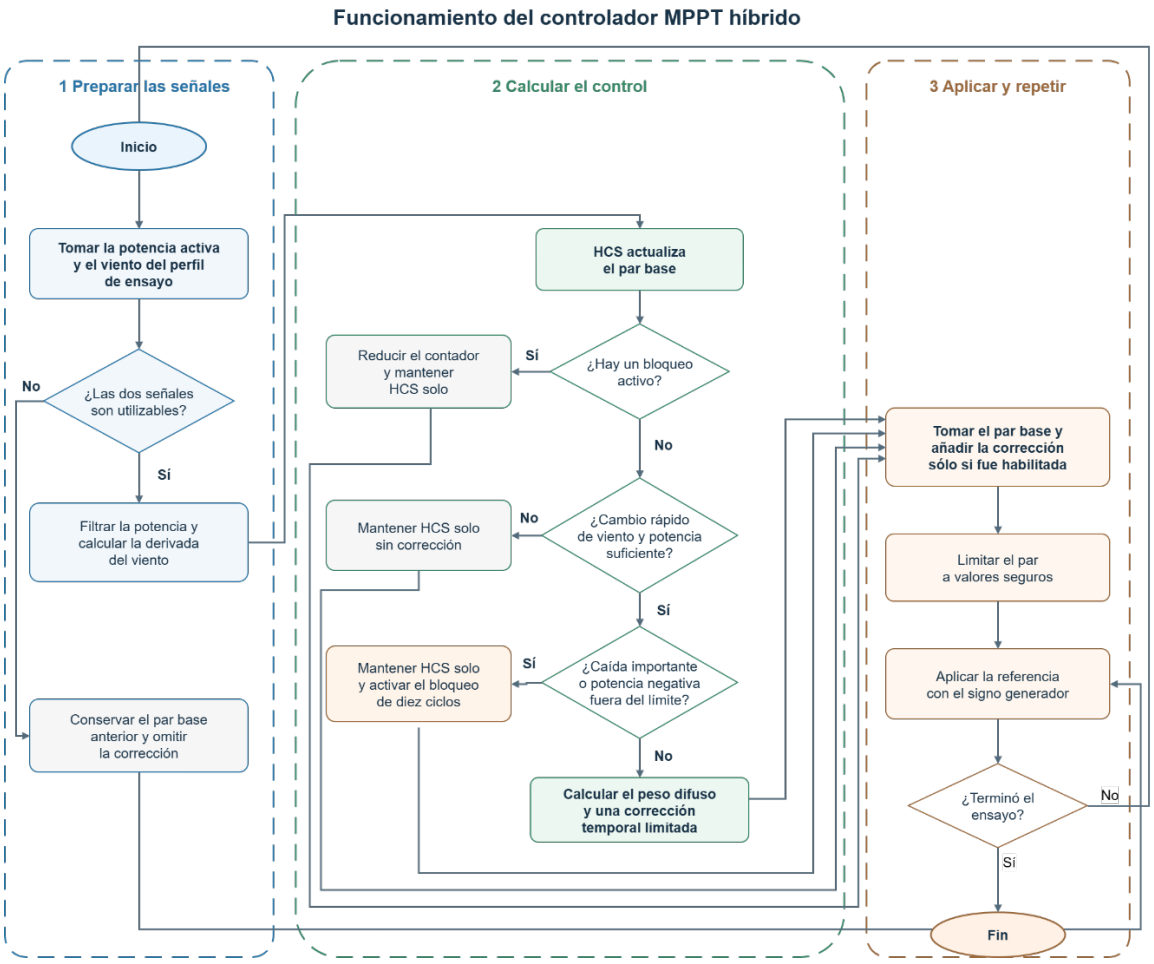


Figura 1. Flujo del controlador MPPT híbrido: preparación de señales, cálculo del control y aplicación de la referencia.
Fuente: elaboración propia.

Puesta experimental y validación

La validación se realizó en el modelo abierto PMSG Wind Turbine with MPPT (P&O) controlled boost converter, publicado en MATLAB Central File Exchange (Shashank, 2026). La planta incluye el perfil de velocidad de viento, el modelo aerodinámico de turbina *y* rotor, la dinámica del eje, un PMSG de 1.5 MW, el convertidor electrónico, el enlace de corriente continua, los controles eléctricos *y* la carga o red equivalente. Esta elección permite evaluar el controlador sobre la interacción entre el subsistema aerodinámico, la dinámica mecánica *y* la conversión eléctrica, sin reducir el problema a una curva ideal de potencia.

Preparación de perfiles y condiciones comunes de validación

Los perfiles de entrada se construyeron a partir del archivo local WTK_Queretaro_2014_80m.csv. Su encabezado registra el identificador de sitio 910216, latitud 20.59169°, longitud −100.388824° *y* zona horaria −6; la columna de velocidad corresponde a una altura de 80 m. La serie contiene 105120 muestras de 2014 a intervalos de cinco minutos. El nombre del archivo *y* los scripts del proyecto lo identifican como WTK, pero no se conserva un registro de descarga que permita confirmar el producto, su versión *y* su cobertura. Por ello, se utiliza como serie meteorológica de entrada *y* no se afirma una procedencia específica verificada. La referencia de (Draxl *et al*., 2015) describe WIND Toolkit como recurso meteorológico modelado, pero no acredita por sí sola el origen de este archivo. Se seleccionaron diez transiciones ascendentes entre 3 *y* 15 m/s *y* se excluyó el evento reservado para ajuste inicial. Cada transición se convirtió en un ensayo de 15 s: 2 s a la velocidad inicial, una rampa de 2 s hacia la velocidad final *y* una ráfaga amortiguada entre 4 *y* 8 s, con parámetro de amplitud acotado a 0.75 m/s. Los perfiles son condiciones de estrés diseñadas a partir de la serie, no reproducciones de turbulencia medida. La selección *y* la generación se realizan mediante preparar_validacion_10_eventos_WTK_PMSG.m *y* ejecutar_validacion_10_eventos_WTK_PMSG.m, respectivamente. La expresión “base de datos real” del título identifica el archivo efectivamente utilizado como antecedente de los ensayos; no implica que sus valores sean mediciones directas de campo ni que los perfiles de 15 s reproduzcan una serie meteorológica completa.

La Tabla 3 resume las condiciones comunes de validación: planta, señales, salida de par, periodo de actualización *y* límites. Su última fila presenta las potencias medias coincidentes de HCS *y* del híbrido en tres ensayos de viento constante. Esa coincidencia es consistente con la desactivación de la corrección cuando la derivada del viento es cero; no constituye una demostración general de equivalencia estacionaria para cualquier condición inicial.

Tabla 3. Condiciones comunes de la puesta experimental y de la validación.

Elemento	Condición
Planta	PMSG detallado, 1.5 MW
Señales al MPPT	Potencia activa y viento del perfil utilizados por el híbrido; velocidad del rotor disponible en la plataforma
Salida del MPPT	Par electromagnético de referencia
Periodo MPPT	0.1 s
Límites de carga eléctrica	−1.00 a −0.20 p.u.
Potencia común HCS/híbrido (4.41, 6.97 y 9.33 m/s)	221.38 / 350.12 / 764.69 kW

Flujo de la evaluación comparativa

La Figura 2 organiza la evaluación en tres etapas: preparar los ensayos, ejecutar las simulaciones *y* analizar los resultados. En la primera se toma la serie meteorológica, se reserva el perfil de ajuste inicial *y* se excluye de la evaluación. Después se seleccionan diez transiciones distintas de ese perfil *y* se construyen las rampas

y ráfagas descritas anteriormente. Esta separación evita utilizar el mismo evento para ajustar el controlador *y* para reportar su evaluación. La selección exige al menos doce muestras de separación, equivalentes a una hora, entre eventos *y* respecto al evento reservado. Este criterio evita seleccionar transiciones próximas, pero no demuestra independencia estadística.

En la segunda etapa de la Figura 2 se fijan la planta, los perfiles, los límites *y* la ventana de integración indicados en la Tabla 3. El bloque de controladores representa cuatro simulaciones separadas para cada perfil: P&O por par, HCS por par, control difuso FIS *y* MPPT híbrido; no indica que actúen simultáneamente sobre la planta. En cada ejecución se registran la potencia activa *y* la referencia de par. La decisión "resultados finitos *y* utilizables" se implementa extrayendo los registros *y* comprobando que los valores de potencia *y* par desde t=2 s sean finitos. La simulación se configura para terminar en t=15 s; el script no incluye una comprobación explícita adicional de la duración de las trazas ni de un número mínimo de muestras. Si una ejecución no cumple estas condiciones, se revisa la configuración *y* se repite la simulación manteniendo las condiciones comunes, antes de incluirla en la comparación.

En la tercera etapa de la Figura 2 se integra la potencia activa desde t=2 s hasta el final de cada ensayo, conservando sus intervalos negativos, mediante la ecuación (3). *A* partir de esas energías se comparan los controladores por perfil *y* se suman los resultados del conjunto. Ambas rutas convergen en el análisis de la energía neta *y* de la actividad de mando. El flujo termina una vez que los ensayos considerados producen registros utilizables *y* se completa el análisis; una mayor energía se interpreta junto con la variación de par, no como evidencia aislada de menor esfuerzo de control.

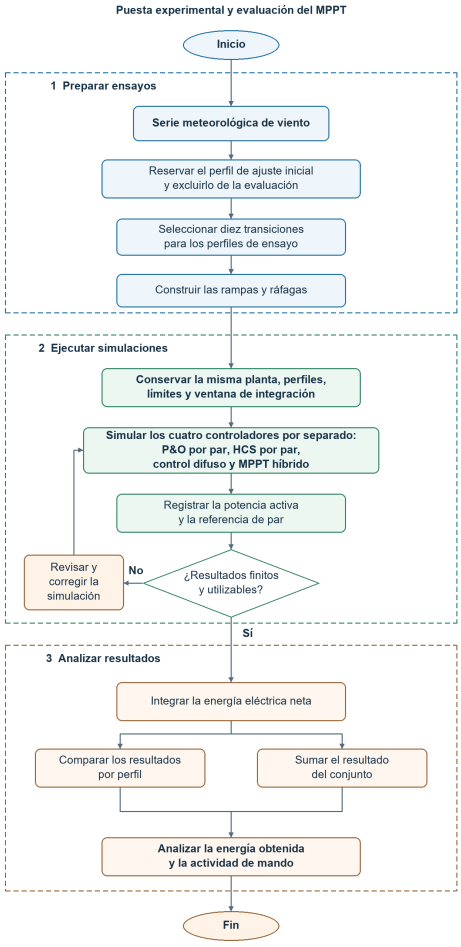


Figura 2. Flujo de la puesta experimental: preparación de ensayos, simulación de los cuatro controladores y análisis comparativo. Fuente: elaboración propia.

Comparación bajo condiciones comunes

Como se observa en la Figura 3, los diez ensayos presentan transiciones *y* ráfagas distintas. Cada perfil se aplicó por separado a los cuatro controladores, con la misma planta, límites, señal de potencia activa *y* ventana de integración. La energía neta se calculó para cada ejecución *y* después se sumó por controlador. También se calculó la variación total de par como la suma de los cambios absolutos de la referencia entre muestras consecutivas en la ventana analizada, para describir la actividad de mando que acompaña a las diferencias energéticas.

Los comparadores se implementaron en tres modelos separados: P&O, HCS *y* control difuso. Cada modelo ejecuta exclusivamente su algoritmo, utilizando la misma interfaz de señales *y* los mismos límites de par. El híbrido utiliza una función específica que conserva HCS *y* añade la corrección temporal descrita. En los cuatro casos, el controlador se muestrea cada 0.1 s *y* su referencia se retiene para la planta eléctrica a 5 µs, con condición inicial de −0.40 *p*.u. La búsqueda inicia con magnitud de par 0.40 *p*.u. *y* sentido positivo; sus límites son 0.20 *y* 1.00 *p*.u., *y* la referencia se envía con signo negativo. La comparación de potencia emplea valores no negativos, pero el cálculo energético conserva la potencia activa original con signo.

En P&O por par, se compara la potencia normalizada no negativa del ciclo actual con la del ciclo anterior, sin utilizar el filtro de potencia para decidir. Si disminuye, se invierte el sentido de perturbación; si aumenta o permanece igual, se conserva. La magnitud del par se actualiza con un paso de 0.020 *p*.u. en ese sentido *y* después se satura. En HCS por par se aplica la misma regla de inversión *y* el mismo paso, pero la comparación se realiza con la potencia filtrada mediante los coeficientes 0.8 *y* 0.2 descritos anteriormente. En estas implementaciones, la diferencia entre ambos comparadores es el filtrado de la señal de decisión, no dos familias de búsqueda completamente distintas.

El controlador difuso independiente utiliza el cambio de potencia filtrada dividido entre 0.03 *y* el paso solicitado en el ciclo anterior dividido entre 0.020, ambos limitados entre −1 *y* 1. Emplea las funciones de pertenencia, la matriz de la Tabla 1, la agregación *y* el redondeo descritos para la inferencia del híbrido. Si el nivel calculado es cero, se sustituye por el signo del paso anterior; si éste también es cero, se adopta el nivel positivo unitario. El signo del nivel determina el sentido del nuevo ajuste *y* su magnitud establece un paso de 0.010 *p*.u. para un nivel de magnitu*d* uno o de 0.020 *p*.u. para uno de magnitud dos. Después se actualiza *y* satura el par, *y* se registra el paso solicitado para el siguiente ciclo.

En el FIS independiente, la salida de inferencia dirige la búsqueda *y* modifica su paso; en el híbrido, sólo se utiliza su magnitud para ponderar una corrección adicional *y* no para sustituir la búsqueda HCS. Además, el FIS independiente recibe el paso anterior, mientras que el híbrido recibe el paso HCS solicitado en el ciclo actual. En el comparador difuso, la entrada normalizada de paso puede tomar −1, −0.5, 0.5 o 1; aunque el valor cero no se alcanza con esta lógica, la función de pertenencia centrada en cero sí puede activarse parcialmente cuando la entrada es −0.5 o 0.5. Por tanto, la ausencia de activación de la columna central señalada para el híbrido no debe extenderse al comparador FIS.

La velocidad del rotor no interviene en las decisiones de estas funciones. P&O, HCS *y* FIS calculan variables auxiliares de viento en la función compartida, pero los tres algoritmos no las utilizan para ajustar el par; sí exigen que potencia *y* viento sean finitos antes de continuar. Si alguna señal no es finita, conservan la magnitud de par almacenada *y* retornan sin actualizar la búsqueda. Las restricciones comunes permiten comparar las implementaciones seleccionadas, pero no demuestran una sintonización óptima de cada método ni superioridad frente a todas las variantes posibles de P&O, HCS o control difuso.

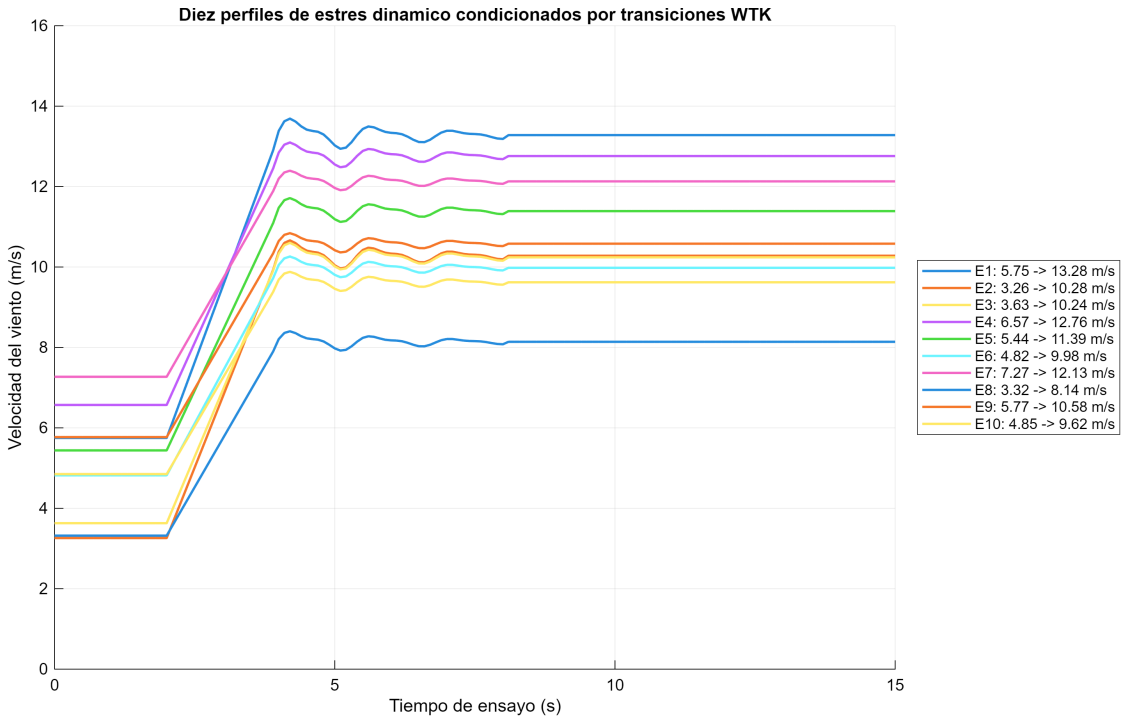


Figura 3. Perfiles de viento de la puesta experimental: diez ensayos de estrés dinámico condicionados por transiciones distintas de una serie meteorológica.
Fuente: elaboración propia.

Resultados

La Tabla 4 *y* la Figura 4 resumen la energía eléctrica neta obtenida por los cuatro controladores. Como se observa en la Tabla 4, el controlador híbrido alcanzó el mayor resultado agregado, con 17.756 kWh. Las energías de P&O por par, HCS por par *y* el controlador difuso FIS fueron 8.893, 12.707 *y* 13.136 kWh, respectivamente. Así, el híbrido incrementó la energía neta en 99.66 % respecto a P&O, 39.73 % respecto a HCS *y* 35.17 % respecto al controlador difuso. Los valores incluyen los intervalos de potencia negativa, por lo que representan el balance eléctrico neto *y* no sólo la energía positiva extraída.

Tabla 4. Energía eléctrica neta agregada y comparación respecto al controlador híbrido.

Controlador	Energía neta (kWh)	Ganancia vs. P&O (%)	Diferencia respecto al híbrido (%)
P&O por par	8.893	0.00	−49.94
HCS por par	12.707	42.89	−28.43
Controlador difuso FIS	13.136	47.71	−26.01
Controlador híbrido por par	17.756	99.66	0.00

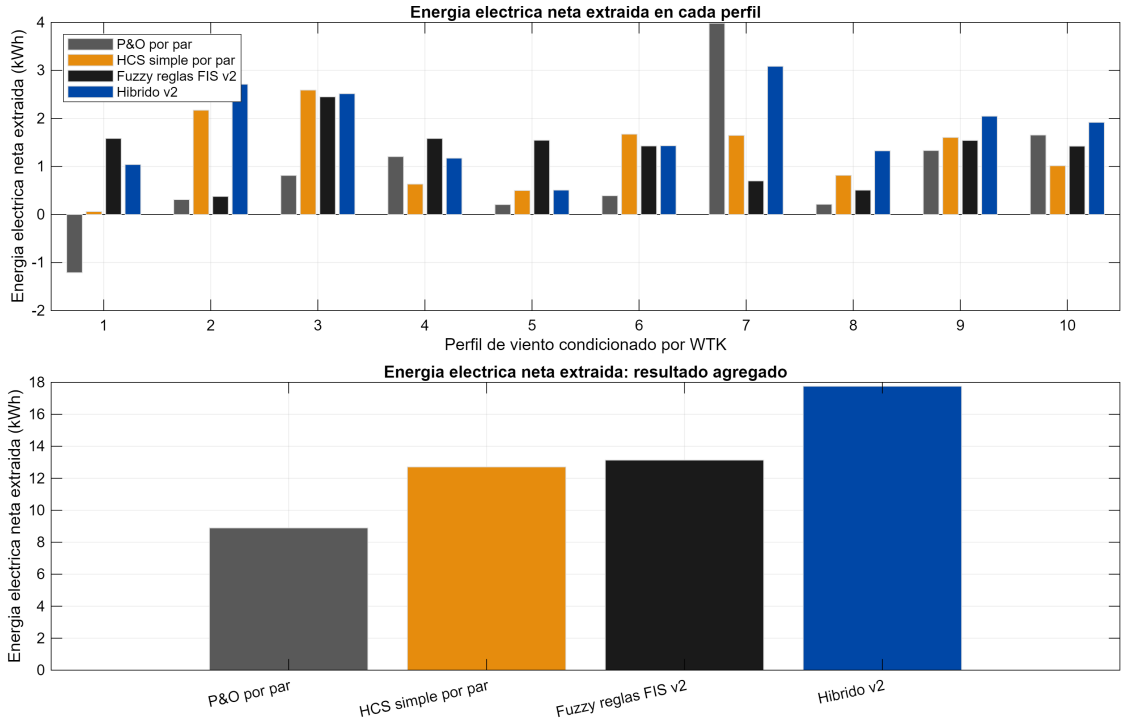


Figura 4. Energía eléctrica neta por perfil y resultado energético agregado de los cuatro controladores. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4, el híbrido obtuvo el primer lugar en cuatro perfiles; el FIS ganó tres, HCS dos *y* P&O uno. Entre los eventos ganados por el híbrido, el evento 2 presentó el mayor margen frente al segundo lugar: 2.7121 kWh frente a 2.1715 kWh de HCS, una diferencia de 0.5405 kWh. Los eventos 8, 9 *y* 10 también favorecieron al híbrido. La variación total de par, definida como la suma de los cambios absolutos de la referencia entre muestras consecutivas, tuvo medias por ensayo de 1.9480 *p*.u. para P&O, 2.3380 *p*.u. para HCS, 0.1760 *p*.u. para FIS *y* 2.5439 *p*.u. para el híbrido. Por tanto, la ventaja energética agregada del híbrido vino acompañada de una mayor variación de mando que la de los otros tres comparadores.

Discusión

El resultado agregado debe interpretarse como el balance de los diez ensayos *y* no como una superioridad absoluta del controlador híbrido en cada trayectoria de viento. El híbrido obtuvo la mayor energía neta acumulada, con mejoras de 99.66 % respecto a P&O, 39.73 % respecto a HCS *y* 35.17 % respecto al controlador difuso FIS. Sin embargo, HCS, P&O *y* el controlador difuso obtuvieron mejores resultados en eventos particulares. Esto confirma que la respuesta relativa depende de la velocidad inicial, la magnitud *y* rapidez de la transición, la dinámica del rotor *y* el régimen final alcanzado.

La arquitectura ofrece una explicación plausible de la ventaja agregada: HCS actualiza el par base *y* la variación filtrada del viento habilita una corrección limitada, ponderada por la lógica difusa. La protección puede anular esa corrección manteniendo la búsqueda base. Sin embargo, la comparación realizada no separa el aporte de las reglas difusas del aporte de la derivada del viento *y* del bloqueo. Para atribuir la mejora a cada componente se requiere comparar también HCS con una corrección por derivada sin ponderación difusa *y* HCS con esa ponderación. Los resultados actuales respaldan el desempeño del conjunto implementado, no una contribución causal aislada de cada capa.

El FIS presentó la menor variación media de par, 0.1760 *p*.u. por ensayo, frente a 2.5439 *p*.u. del híbrido. El híbrido también superó la variación de HCS *y* P&O; por ello, sus límites de amplitud no implican menor actividad de mando. La suavidad del FIS coexistió con una energía agregada menor, pero los datos no bastan para atribuir esa diferencia exclusivamente a una menor rapidez de reacción. Deben considerarse conjuntamente la energía, la actuación *y* la dinámica de cada evento.

Este comportamiento es consistente con estudios que emplean lógica difusa para adaptar transitoriamente la búsqueda MPPT *y* reducir el compromiso entre rapidez *y* oscilación (Gouabi *et al*., 2023; Dahmane *et al*., 2024; Karthikeyan *y* Ramakrishnan, 2024). No obstante, no es válido realizar una comparación numérica directa, debido a las diferencias en planta, variable manipulada, límites de actuación *y* perfiles de viento empleados.

Una limitación importante es que la evaluación no se ejecutó sobre la serie meteorológica completa. El uso de registros extensos en simulaciones de la planta PMSG detallada incrementaba el tiempo de cómputo, el uso de memoria *y* los problemas numéricos en Simulink. Por ello, se seleccionaron de la serie diez transiciones distintas, separadas entre sí *y* respecto al evento de ajuste por al menos una hora, *y* se construyeron perfiles de ensayo de 15 s. Estos perfiles conservan las velocidades inicial *y* final de cada transición e incorporan una ráfaga diseñada *y* reproducible. La decisión permitió comparar los cuatro controladores bajo las mismas condiciones, pero no equivale a estimar la producción energética anual de un aerogenerador.

Los perfiles se diseñaron a partir de muestras separadas por cinco minutos. Las rampas de dos segundos *y* las ráfagas añadidas introducen dinámicas que no se observan directamente en esas muestras. Los metadatos del archivo permiten identificar la serie utilizada, pero no confirmar su pertenencia a una versión específica de WIND Toolkit. Esta incertidumbre de procedencia no altera que los cuatro controladores recibieran exactamente los mismos perfiles; sí limita su representatividad meteorológica *y* exige recuperar el registro de descarga antes de atribuirlos a un producto concreto. Los resultados no permiten generalizar la ventaja a otros sitios, estaciones, turbulencias ni perfiles continuos.

Otra limitación es la dependencia de una sola planta PMSG de 1.5 MW *y* de parámetros fijos de activación, filtrado *y* corrección. La respuesta puede cambiar con la inercia, los controles eléctricos, el muestreo *y* los límites. El híbrido requiere una señal de viento para su intervención adicional; en simulación esa señal se conoce por construcción, mientras que una implementación física exige obtenerla mediante instrumentación o un estimador que todavía no se implementó. Además, la energía eléctrica neta incluye periodos de potencia negativa *y* puede incorporar cambios de energía almacenada en el rotor *y* el enlace de corriente continua. Sin verificar los estados energéticos iniciales *y* finales, la mejora porcentual describe el balance eléctrico de estos ensayos *y* no una eficiencia MPPT absoluta ni un incremento equivalente de extracción aerodinámica. La denominación de búsqueda directa corresponde a HCS; la arquitectura completa combina esa búsqueda con una intervención dependiente del viento *y* no utiliza exclusivamente señales eléctricas. Además, la protección se evalúa sólo al habilitar la intervención adicional, *y* la inferencia utiliza el paso HCS solicitado en el ciclo actual. Estos detalles deben conservarse al reproducir el método.

La comparación directa con el método HCS-Fuzzy de Javadi *y* Hazin (2014) no se incluyó porque su implementación preliminar en la planta utilizada presentó problemas de estabilidad numérica *y* no produjo simulaciones reproducibles. La diferencia entre velocidad de referencia *y* par electromagnético exige adaptar los lazos *y* las restricciones, pero no impide por sí misma una comparación. Los resultados actuales se limitan a los cuatro controladores que se ejecutaron de forma estable bajo las condiciones comunes de ensayo.

Conclusiones y trabajo futuro

El controlador híbrido obtuvo la mayor energía eléctrica neta en el conjunto de diez transitorios evaluados, con mejoras de 99.66 % respecto a P&O, 39.73 % respecto a HCS *y* 35.17 % respecto al controlador difuso FIS. HCS, P&O *y* el controlador difuso obtuvieron mejores resultados en algunos eventos; las ventajas del híbrido en los perfiles donde respondió mejor compensaron esas pérdidas puntuales. La conclusión se limita al balance eléctrico del conjunto ensayado *y* no demuestra superioridad universal, una mayor eficiencia MPPT absoluta ni un incremento equivalente de extracción aerodinámica.

El FIS tuvo una actuación más suave *y* el híbrido obtuvo mayor energía agregada con mayor variación media de par. Este resultado señala un compromiso de diseño que deberá examinarse según la capacidad de los actuadores *y* la dinámica eléctrica. La continuidad de HCS *y* la corrección temporal permiten mantener una búsqueda base común, pero la contribución individual de la lógica difusa, la derivada del viento *y* la protección aún debe determinarse mediante ensayos específicos.

La aportación actual es una arquitectura por par que conserva la búsqueda HCS *y* añade una corrección temporal ponderada por inferencia difusa, con activación por variación de viento *y* límites explícitos. Su ventaja energética agregada coexistió con una mayor actividad de mando, por lo que su aplicación práctica exige evaluar ese compromiso, obtener la señal de viento *y* completar la trazabilidad de la serie

meteorológica. La búsqueda base no requiere una curva óptima almacenada de la turbina; la utilidad física de la arquitectura completa deberá examinarse mediante pruebas de funcionamiento.

Como trabajo futuro, se realizará una comparación directa con el método HCS-Fuzzy de Javadi y Hazin (2014), que utiliza lógica difusa para variar el paso de actualización de la velocidad de referencia del rotor. La comparación no se incorporó en esta etapa porque la adaptación preliminar no alcanzó estabilidad numérica ni reproducibilidad. Una vez resuelta, ambos métodos deberán evaluarse con la misma planta y perfiles de viento, ventanas de integración iguales y restricciones físicas equivalentes. La equivalencia de restricciones se establecerá en la interfaz de actuación de la planta, ya que velocidad de referencia y par electromagnético son variables distintas.

La siguiente etapa ampliará los ensayos con perfiles descendentes *y* registros de mayor resolución, documentará la procedencia del recurso meteorológico *y* analizará la sensibilidad de los umbrales, filtros *y* límites. También se compararán variantes que permitan separar el aporte de la derivada, la ponderación difusa *y* la protección, *y* se verificarán los estados energéticos del rotor *y* del enlace de corriente continua. Después de completar la evaluación por simulación se plantea implementar el controlador en un túnel de viento para realizar pruebas de funcionamiento, con adquisición de señales *y* límites de seguridad. Esta etapa tendrá alcance funcional; una validación experimental comparativa del desempeño requerirá un protocolo adicional.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería y a la Maestría en Mecatrónica de la Universidad Autónoma de Querétaro por el acompañamiento académico brindado durante el desarrollo de este trabajo. Omar Cruz Bárcenas agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado mediante la Convocatoria de Becas Nacionales para Estudios de Posgrado 2026-1, número de apoyo 4074292, en el programa de Maestría en Ciencias–Mecatrónica de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Referencias

Abdellatif, W. S. E., Saleh, A. L., Salem, A. A., Számel, L., & Nouraldin, N. A. (2025). Wind-speed estimation maximum power point tracking scheme for permanent magnet synchronous machine-based wind energy conversion systems. *Journal of Power Electronics*. https://doi.org/10.1007/s43236-025-01161-8

Banerjee, S., & Maity, T. (2025). Exploring conventional and recent algorithms for WECS: A comprehensive review of literature for MPPT. *IETE Technical Review,* 42(1), 121-147. https://doi.org/10.1080/02564602.2025.2485899

Dahmane, K., Bouachrine, B., Ajaamoum, M., Imodane, B., Benydir, M., El Idrissi, A., Mandal, K., & El Aroudi, A. (2024). Fuzzy logic based adaptive P&O MPPT control of a DC-DC boost converter used in a wind energy conversion system with a permanent magnet synchronous generator. *IFAC-PapersOnLine,* 58(13), 587-592. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.546

Debbabi, F., Mehazzem, F., & Soubdhan, T. (2026). Experimental implementation of MPPT algorithms for wind energy systems using a HIL wind turbine emulator in a tropical context. *Energy Conversion and Management: X, 31*, 102023. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.102023

Draxl, C., Hodge, B., McCaa, J., & Clifton, A. (2015). The Wind Integration National Dataset (WIND) Toolkit. *Applied Energy,* 151, 355-366. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.121

El Aissaoui, H., El Ougli, A., & Tidhaf, B. (2025). MPPT using PSO technique comparing to fuzzy logic and P&O algorithms for wind energy conversion system. *Intellectual Journal of Energy Harvesting and Storage,* 3(1), 26-37. https://doi.org/10.11591/ehs.v3i1.pp26-37

Gaied, H., Naoui, M., Kraiem, H., Goud, B. S., Flah, A., Alghaythi, M. L., Kotb, H., Ali, S. G., & Aboras, K. (2022). Comparative analysis of MPPT techniques for enhancing a wind energy conversion system. *Frontiers in Energy Research,* 10, 975134. https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.975134

Gouabi, H., Hazzab, A., Habbab, M., Rezkallah, M., Chandra, A., & Ibrahim, H. (2023). Fuzzy adaptive dP-perturb and observe maximum power point tracking controller for wind energy conversion systems: Design and real-time implementation. *Sustainable Energy, Grids and Networks,* 36, 101230. https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101230

Javadi, S., & Hazin, M. H. (2014). An improved MPPT method of wind turbine based on HCS method by using fuzzy logic system. *International Journal of Smart Electrical Engineering,* 3(1), 29-35.https://oiccpress.com/ijsee/article/view/16239

Karthikeyan, S., & Ramakrishnan, C. (2024). A hybrid fuzzy logic-based MPPT algorithm for PMSG-based variable speed wind energy conversion system on a smart grid. *Energy Storage and Saving,* 3(4), 295-304. https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.08.001

Mousa, H. H. H., Youssef, A.-R., & Mohamed, E. E. M. (2021). State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 126, 106598. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106598

Nguyen, V. T., Truong, T. B. T., Nguyen, H. V. P., Nguyen, B. N., Truong, Q. V., Nguyen, T. Q., & Le, M. T. (2025). Optimizing wind turbine performance using fuzzy logic-controlled MPPT algorithms. *Proceedings of the IEEE 2nd Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering.* https://doi.org/10.1109/EEE-AM66675.2025.11473813

Pande, J., Nasikkar, P., Kotecha, K., & Varadarajan, V. (2021). A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy conversion systems. *Journal of Marine Science and Engineering,* 9(11), 1187. https://doi.org/10.3390/jmse9111187

Shashank. (2026). PMSG Wind Turbine with MPPT (P&O) controlled boost converter [MATLAB Central File Exchange]. *MathWorks.* https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/174070-pmsg-wind-turbine-with-mppt-p-o-controlled-boost-converter

Teklehaimanot, Y. K., Akingbade, F. K., Ubochi, B. C., & Ale, T. O. (2024). A review and comparative analysis of maximum power point tracking control algorithms for wind energy conversion systems. *International Journal of Dynamics and Control,* 12, 3494-3516. https://doi.org/10.1007/s40435-024-01434-3