

## DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO EN AEROGENERADORES CON MINIMIZACION DE LAS PERDIDAS EN LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA

---

Nelson Aros Oñate

Pablo Sánchez Fuentes

*Universidad de la Frontera (Chile)*

### Abstract

At present the energy efficiency of production processes is a matter of highest priority, and raises the design of an optimal control system for a wind turbine that minimizes the losses in energy transfer. The control system consists of an observer-state Kalman-filter and a model based predictive control. The results obtained via simulation with the proposed control strategy and compared with a LQR control scheme; show a better transfer of wind energy to electrical energy. Furthermore, we find that the optimal control applied to the system has the capacity to withstand strong shocks at the entrance and bring with control laws that allow a good performance of wind turbine system while the state feedback controller provides stability in the response of system but with less energy transfer and the latter does not support strong wind disturbances. In conclusion we find that the optimal control scheme meets the requirements established for optimum transfer of power from the system for converting wind energy into the network and is robust to strong wind shocks and demands from the network.

**Keywords:** *Energy efficiency; renewable energy; wind power generation; predictive control*

### Resumen

En la actualidad la eficiencia energética de los procesos productivos es un tema de mayor prioridad, así se plantea el diseño de un sistema de control óptimo para un aerogenerador que minimiza las pérdidas en la transferencia de energía. Este sistema de control está compuesto por un observador de estados -Filtro de Kalman- y un control predictivo basado en modelo. Los resultados obtenidos vía simulación, con la estrategia de control propuesto y comparado con un esquema de control LQR, revelan que se produce una mejor transferencia de energía eólica a energía eléctrica. Además, se encuentra que el control óptimo aplicado al sistema posee la capacidad de soportar fuertes perturbaciones en las entradas y aportar con leyes de control que permiten tener un buen desempeño del sistema aerogenerador mientras que el controlador con realimentación de estados otorga estabilidad en la respuesta del sistema pero con una menor transferencia de energía y este último no soporta fuertes perturbaciones del viento. Como conclusión se encuentra que el esquema de control óptimo cumple con los requerimientos establecidos de transferencia óptima de potencia, desde el sistema de conversión de energía eólica hacia la red y es robusto ante fuertes perturbaciones de viento y exigencias desde la red.

**Palabras clave:** *eficiencia energética; energía renovable; generación eólica; control predictivo*

## 1. Introducción

En un sistema de generación eólica, uno de los principales problemas es lograr la transferencia óptima de energía desde el campo de viento (energía mecánica) a la carga (energía eléctrica), aún más en un sistema de conversión de velocidad variable la transferencia convive en una dependencia bilateral (Steinbuch, 1989). La causa de esta relación bilateral son las perturbaciones: la velocidad del viento y la potencia requerida por la carga. Si no se diseñan controladores que rechacen estas perturbaciones las consecuencias sobre el sistema aerogenerador pueden ser del tipo: mecánicas y/o eléctricas.

**Fatiga mecánica.** La componente aleatoria del viento produce variaciones aleatorias en la velocidad angular, siendo las componentes de la etapa mecánica del sistema de conversión eólico de velocidad variable más afectadas por fatiga: la caja de engranajes y el eje de alta velocidad.

**Fluctuaciones indeseadas de potencia mecánica y eléctrica.** Además, estas variaciones también recaen sobre el coeficiente de potencia de las aspas,  $C_p(\lambda, \beta)$ , por medio de la razón de velocidad en la punta de las aspas,  $\lambda$  y el ángulo de enfrentamiento de las palas con el viento,  $\beta$ ; así estas variaciones pueden inducir excesivas variaciones en el torque mecánico transferido al generador. También, los requerimientos de potencia en la carga afecta la velocidad mecánica y por ende el coeficiente de potencia de las aspas.

### 1.1 Sistema de generación eólica

En los sistemas de generación eólica, las oscilaciones mecánicas son un ente de frecuente aparición y han sido tratados desde diversos puntos de vista.

En Steinbuch (1989) se diseña y modela un sistema aerogenerador de velocidad variable y control de pitch. El sistema es linealizado por medio de la Teoría de Floquet y de ahí se obtiene un modelo medio a través del Teorema de Reducibilidad de Lyapunov. Se diseñan controladores por realimentación de estados lineal cuadrático,  $LQ$ ; realimentación de la salidas lineal cuadrático,  $LQOF$ ; y  $LQOF$  dinámico.

En Uctug et al. (1994) se diseña un sistema de control para optimizar la transferencia de energía a la red eléctrica. Se utiliza un generador de inducción de doble salida aplicado a una turbina eólica, además un rectificador completamente controlado fue puesto en lado del rotor. A partir de este esquema se deducen las ecuaciones en estado estacionario para las corrientes y voltajes del estator, rotor y el deslizamiento. La potencia mecánica de entrada es controlada por el ángulo de pitch en las aspas. La realimentación de estados y las salidas de los controladores fueron diseñadas usando el software MATLAB para regular las salidas del generador de inducción.

En De Battista et al. (2000), para lograr un buen desempeño ante perturbaciones, diseña controladores con la metodología de control en modo deslizante a partir de un modelo aproximado de la planta, pero que toma en cuenta las componentes variacionales del viento los cuales pueden inducir excitaciones en los modos estructurales de los sistemas eólicos y por lo tanto producir oscilaciones en el torque mecánico. El sistema de control desarrollado satisface un compromiso entre la eficiencia de conversión y el rechazo de las oscilaciones del torque.

En Muljadi & Butterfield (2001) se estudia el comportamiento de una turbina eólica genérica de velocidad variable ante vientos de tipo turbulentos. Se establecen dos métodos de control para la potencia aerodinámica: a) el primero, el control de pitch en las aspas y b) el segundo, el control de carga; así con el fin de evaluar las bondades que entrega los aerogeneradores de velocidad variable se realiza la comparación del desempeño con las turbinas eólicas de velocidad constante. De este estudio se encuentra que la turbina puede

capturar un máximo energético en un amplio rango de velocidades de viento cuando minimizan la carga desde el generador.

En Cutululis et al. (2002) se estudia el desempeño en alta frecuencia del viento de la etapa mecánica de un sistema eólico. En particular, con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico del sistema eólico para distintos niveles de variación de la velocidad de viento, realiza una separación en la frecuencia del viento, una para baja frecuencia (componente estacional o media) y otra para alta frecuencia. De acuerdo a esta separación en la frecuencia, (Munteanu et al., 2005), toma la componente variacional y propone un diseño de controlador óptimo *LQG* que permite trabajar en los dos rangos de frecuencias del viento por separado y también permite que el sistema sea menos dependiente o sensible del punto de operación. Así, su propuesta se implementa en hardware y realiza pruebas de validación cuyos resultados permiten corroborar exitosamente la propuesta.

En Inoue (2006) se habla sobre la capacidad de capturar más energía desde el viento analizando las posibles pérdidas debidas a la aerodinámica de las aspas. El análisis está basado en una función de la velocidad de viento en estado estacionario. Con este método se pueden calcular las pérdidas, la potencia producida y las salidas del generador. Los datos están basados en la curva de densidad de probabilidad de Weibull.

En Stol & Balas (2002) se diseñaron controladores en espacio estados con ganancias periódicas para regular la velocidad de las turbinas y reducir la carga para una máquina con un hub de 2 aspas. El desempeño del controlador es probado con técnicas de control de acomodación de perturbaciones para estimar las fluctuaciones del viento. El objetivo de control es regular la velocidad del rotor en torno a distintas velocidades de viento mientras se mitigan por cargas las bases de las aspas. El controlador propuesto se compara con un control PID y los resultados indicaron que un diseño en espacio estados es efectivo para reducir las cargas en las aspas sin sacrificar demasiado esfuerzo de control de velocidad. El controlador periódico muestra que es de mayor potencial porque utiliza un modelo de turbina variante en el tiempo para estimar los estados no medibles.

En Almeida & Lopes (2007), se propone un sistema de control al sistema eólico apoyado por generadores de inducción de doble alimentación para realizar regulación de la frecuencia del sistema. Los generadores operan de acuerdo a la curva de operación de extracción de máxima potencia tal que la potencia activa entregada por cada turbina eólica se incrementa o decrementa durante los cambios en la frecuencia. La estrategia de control está definida en la alimentación de la carga por la regulación de frecuencia aplicando convertidores estáticos y el control de pitch para el ajuste de la velocidad del rotor y la potencia activa de acuerdo a la curva del óptimo de potencia. El método resulta efectivo logrando un aceptable control sobre el sistema.

En Bianchi et al. (2007) se aborda el problema de la regulación de potencia de sistemas de conversión eólicos de velocidad variable y pitch fijo lo cual desemboca en el desarrollo de un controlador de estructura variable, de esta forma aplica controladores con ganancia programable.

En Erlich et al. (2007) presenta un estudio de sistemas generadores eólicos de velocidad variable controlados por pitch y modelan generadores de inducción de doble alimentación (DFIG, Double Fed Induction Generator). Ellos implementaron un desempeño dinámico de turbinas conectadas a la red en modelos reales pero con DFIG de orden reducido y está restringido a calcular la componente fundamental de la frecuencia. Mejoran el funcionamiento del sistema introduciendo la posibilidad de incluir las componentes alternantes de la corriente en el rotor, lo cual es necesario para la activación de la operación de la barra. Modelos factibles son presentados para el lado de la red y el rotor así como también para el enlace DC, tomando en cuenta los cuatro posibles modos de operación. El modelo propuesto para el control de velocidad y ángulo de pitch puede ser utilizado cuando

las variaciones de viento y velocidad de rotor son significativas. Los resultados se verifican en granjas eólicas mar adentro.

En Kim & Kim (2007), se presentan el modelado y simulación dinámica de una conexión a la red de aerogeneradores de velocidad variable (VSWT) utilizando PSCAD/EMTDC. El sistema posee componentes mecánicos, eléctricos y de electrónica de potencia. Se modelan las etapas en PSCAD/EMTDC. La estrategia de control del inversor está destinada a capturar la máxima energía de viento manteniendo un control de energía reactiva y un predeterminado nivel de factor de potencia constante.

## 1.2 Sistemas de control avanzado

Como apoyo en el análisis de los efectos de la variabilidad del viento como ente estocástico sobre el sistema mecánico del aerogenerador se tiene que en Graver & Huang (1998) se realiza una introducción a las señales aleatorias y al filtro de Kalman. Se explica la base teórica estadística de la formulación del filtro y después se deduce con las distintas herramientas de análisis probabilística existente.

Por otro lado, en la academia e industria, los sistemas de control predictivos despiertan un gran interés en su desarrollo debido a su capacidad de predicción, buen desempeño bajo perturbaciones medibles e incertidumbre en la planta, incorporación de restricciones. Así, Camacho & Bordons (1999) aborda los elementos esenciales para controlar un sistema diseñado en espacio estados o en función de transferencia con distintas dinámicas que interactúan con el sistema, incluyendo entre éstas: perturbaciones medibles, ruido coloreado y además la formulación multivariable del control predictivo generalizado.

En Mikles & Fikar (2007) y Rossiter (2004) se describen métodos de identificación y control y varios ejemplos de procesos en donde se aplica control predictivo. Los procesos que comúnmente se ejemplifican están referidos a transferencia de calor y reactores químicos. De acuerdo al estudio bibliográfico realizado, no se detectan modelos de control predictivos basados en modelo, formulados para los sistemas de conversión de energía eólica.

## 2. Objetivo

El objetivo del trabajo es diseñar un controlador predictivo multivariable formulado en variables de estado apoyado por un observador de estados, aplicado a un sistema de conversión de energía eólica de velocidad variable con transferencia óptima de energía.

Los motivos de la aplicación de control predictivo generalizado en el sistema aerogenerador son: sus capacidades predictivas, la posibilidad de incluir restricciones y la penalización de la ley de control en la función objetivo,  $J(\mathbf{u})$ , para lograr un buen desempeño a un costo optimizado. El comportamiento óptimo del sistema aerogenerador se obtiene a partir de la minimización de la función objetivo que está en función del vector de control,  $\mathbf{u}$  y el error,  $\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}$ , donde  $\mathbf{y}$  es el vector de las salidas e  $\hat{\mathbf{y}}$  es el vector de las salidas predichas. El funcional de costo establece el compromiso entre el error cometido en seguir a la referencia y la energía utilizada en el control.

Los aportes esperados del sistema de control son:

**Disminuir la fatiga mecánica:** La fatiga mecánica se produce por las vibraciones mecánicas en el sistema de conversión eólico de velocidad variable, así los esfuerzos mecánicos producto de la componente aleatoria del viento son minimizados al considerar el modelo en su diseño (Munteanu et al., 2005).

**Disminuir las fluctuaciones indeseadas de potencia mecánica y eléctrica:** La fluctuación de potencia mecánica en el eje de alta velocidad y la potencia eléctrica en el enlace de corriente continua se produce por la presencia de las perturbaciones de viento y potencias en la carga (Steinbuch, 1989).

**Buen seguimiento de referencia:** Las variables a controlar en el sistema de conversión eólico son: la variación de velocidad angular medida,  $\tilde{\omega}_{gm}$ , la variación de la corriente del enlace de corriente continua,  $\tilde{I}_{dc}$  y la variación del torque mecánico del eje de alta velocidad,  $\tilde{T}_m$ . Entonces se espera mantener una variación de un máximo de un 20% de las salidas si hay variación de un 20% en alguna referencia.

**Bajo esfuerzo de control:** El esfuerzo de control es minimizado ya que está en la función objetivo.

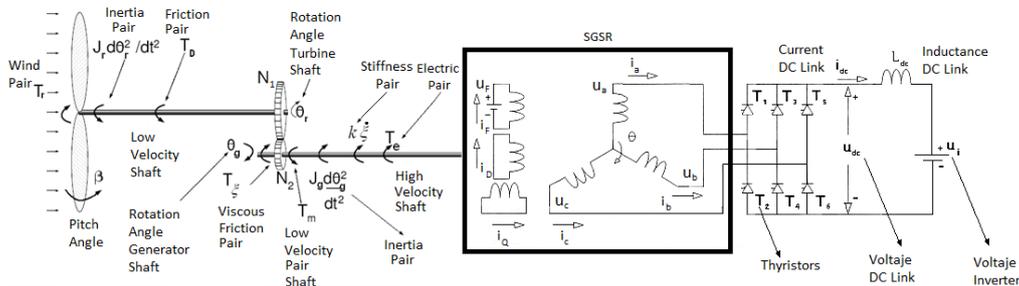
### 3. Metodología

El controlador diseñado, para el sistema de conversión eólico de velocidad variable, se basa principalmente en el diseño de un funcional de costo cuyas penalizaciones son los más significativos en el proceso de transformación de energía eólica en energía eléctrica. Este funcional se diseña para el control predictivo basado en modelo (MBPC), el cual es aplicado en la etapa eléctrica y mecánica. Por otra parte, se aplica un filtro de Kalman para la identificación de las salidas y estados afectados por ruidos blancos. Los resultados son vía simulación del sistema de conversión eólico, en ambiente Simulink/Matlab apoyado con scripts.

#### 3.1 Modelo del sistema eólico

Un sistema aerogenerador es un mecanismo de transformación de energía cinética del viento a energía eléctrica, donde los componentes son: Aspas, rotor de baja velocidad, caja multiplicadora, rotor de alta velocidad, generador síncrono de rotor cilíndrico, rectificador controlado, enlace DC, inversor, carga; ver Figura 1.

Figura 1. Componentes sistema aerogenerador



En el diseño de los aerogeneradores de alta potencia comúnmente se tiene en cuenta la dinámica de funcionamiento de la etapa mecánica con modelos que describan lo más fehacientemente su comportamiento, debido a que el régimen estocástico del viento induce vibraciones de alta frecuencia en los componentes mecánicos, y estas vibraciones producen como consecuencia un torque eléctrico oscilante (Steinbuch, 1989). Por este motivo en la etapa mecánica se incluye un modelo de vibraciones, en donde la vibración se refleja en el grado de amortiguación de la velocidad angular en el eje de alta velocidad.

Por otra parte en la etapa de electrónica de potencia los semiconductores se deben activar y desactivar de acuerdo a una cierta frecuencia, considerando su modelo en estado cuasi estacionario.

**El modelo mecánico:**

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \tag{1}$$

$$\frac{d\theta_g}{dt} = \omega_g \quad (2)$$

$$J_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_r - T_D \quad (3)$$

$$T_D = C_1 + \frac{C_2}{\omega_r} + C_3 \omega_r \quad (4)$$

$$T_r = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3}{\omega_r} \quad (5)$$

$$P_r = \omega_r T_r \quad (6)$$

$$T_\xi = 10^4 (100\xi^3 - 20\xi^2 + 2\xi) \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (8)$$

$$J_\eta \frac{d^2\xi}{dt^2} = \eta \frac{J_\eta}{J_r} (T_r - T_D) + \frac{J_\eta}{J_g} T_e - k\xi - T_\xi \quad (9)$$

$$\frac{(\omega_g + \dot{\xi})}{\eta} = \omega_r \quad (10)$$

$$\dot{\beta} = \frac{1}{\tau_\beta} (\beta_r - \beta) \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_{gm} = \frac{1}{\tau_\omega} (\omega_g - \omega_{gm}) \quad (12)$$

donde las ecuaciones (1)-(5) representan el movimiento en el eje de baja velocidad, el par fricción en el eje baja velocidad, el par del eje de baja velocidad y la potencia mecánica respectivamente. La ecuación del coeficiente de potencia es obtenida de los datos en el diseño aerodinámico de la fabricación de las palas, por lo tanto la curva representativa del coeficiente de potencia para esta turbina viene dado en Steinbuch (1989). Las ecuaciones (6)-(12) representan par viscoso, la razón de velocidad en la punta de las aspas, el movimiento del eje de alta velocidad, la velocidad en el eje de baja velocidad, la dinámica del ángulo de pitch de las palas y la velocidad medida por el sensor del eje de alta velocidad.  $\eta = N_2/N_1$ , es la razón de vueltas de los engranajes,  $\tau_\beta, \tau_v$ , son las constantes de tiempo de los sensores del ángulo de pitch y velocidad eje alta velocidad.

En la etapa eléctrica se tiene un generador sincrónico de rotor cilíndrico junto a un rectificador controlado hasta el enlace DC. Las ecuaciones que describen esta etapa están descritas en Steinbuch (1989).

El modelo linealizado que representa al sistema de conversión eólico está dado por la ecuación (13), ver Steinbuch (1989). En este trabajo se consideran ruidos acoplados a la entrada y a las salidas para el análisis con un observador de estados.

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x}(t) + B\tilde{u}(t) + E\tilde{w}(t) + G\tilde{w}_o(t) \quad (13)$$

$$\tilde{y}(t) = C\tilde{x}(t) + \tilde{v}(t)$$

Resultando:

$$\frac{d\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & a_{37} & a_{38} & a_{39} & a_{30} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 & 0 & 0 & a_{47} & a_{48} & a_{49} & a_{40} \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{74} & 0 & a_{76} & a_{77} & a_{78} & a_{79} & a_{70} \\ 0 & 0 & 0 & a_{84} & 0 & a_{86} & a_{87} & a_{88} & a_{89} & a_{80} \\ 0 & 0 & 0 & a_{94} & 0 & a_{96} & a_{97} & a_{98} & a_{99} & a_{90} \\ 0 & 0 & 0 & a_{04} & 0 & a_{06} & a_{07} & a_{08} & a_{09} & a_{00} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{62} & 0 \\ 0 & 0 & b_{73} \\ 0 & 0 & b_{83} \\ 0 & 0 & b_{93} \\ 0 & 0 & b_{03} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{u}} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ e_{31} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & e_{72} \\ 0 & e_{82} \\ 0 & e_{92} \\ 0 & e_{02} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{w}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_{31} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{w}}_0 \tag{14}$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & c_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{42} & c_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{n}(t)$$

Donde los parámetros vienen dados en Steinbuch (1989) y para el ruido en Sánchez (2008). Por otra parte el modelo utilizado para la segunda situación, es decir, para control con GPC viene dado como en (14) pero sin la componente de ruido blanco en la entrada de viento y en las salidas. Los detalles del punto de operación, el análisis de estabilidad, la observabilidad y la controlabilidad del sistema, se dan en Sánchez (2008), donde se obtiene que el sistema es estable, observable y controlable.

### 3.2 CONTROL

El modelo del sistema de conversión eólica, es controlado con GPC-FK y GPC, sin restricciones y multivariable. Las metodologías GPC-FK y GPC, buscan minimizar el funcional de costo (16), encontrando una ley de control  $\Delta\tilde{\mathbf{u}}(k)$  dada por (17), con ganancia K dada por (18), tal que se satisface la minimización de (16) Hay que dejar en claro que las expresiones de (16)-(18) pertenecen a GPC-FK, mientras que para GPC es trivial. En Sánchez (2008) se encuentran los detalles de las matrices que componen a GPC.

$$\mathbf{J}(\mathbf{u}) = [\omega_{ref} - \hat{\mathbf{y}}(k)]^T \mathbf{R} [\omega_{ref} - \hat{\mathbf{y}}(k)] + \Delta\tilde{\mathbf{u}}^T \lambda \Delta\tilde{\mathbf{u}} \tag{16}$$

$$\Delta\tilde{\mathbf{u}}(k) = \mathbf{K} \left( \omega_{ref} - \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{H} \begin{bmatrix} \Delta\tilde{\mathbf{w}}(k) & \Delta\tilde{\mathbf{w}}_0(k) \end{bmatrix}^T \right) \tag{17}$$

$$\mathbf{K} = (\mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{G} + \lambda)^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{R} \tag{18}$$

## 4. PRUEBAS

### 4.1 Aspectos a considerar

En pos de evaluar el desempeño de los controladores GPC-FK y GPC, se analizan bajo 2 aspectos:

#### Aspecto 1.-El rechazo a perturbaciones desde el viento y la carga.

De esta prueba se demuestra cuán robusto es el comportamiento del sistema eólico con el control GPC-FK y el control GPC. Para efectos de comparación se utiliza como referencia un controlador óptimo LQ. De aquí, se evalúa cuanta energía es capaz de transferir en forma óptima la turbina eólica hacia la carga, así conociendo cuanta energía es capaz de transferir, se evalúa si se cumple el objetivo de este estudio. Así, se consideran:

- Excitación escalón unitario desde la velocidad nominal de viento.
- Excitación escalón unitario del voltaje nominal en la carga.

- De las pruebas anteriores se obtiene la potencia transferida.

### Aspecto 2.-La regulación.

Esto implica someterlo a variaciones en las referencias. Son 3 las mediciones de interés, de las cuales solo se muestra la velocidad en el eje de alta velocidad  $\omega_{gm}$ . Aquí se considera:

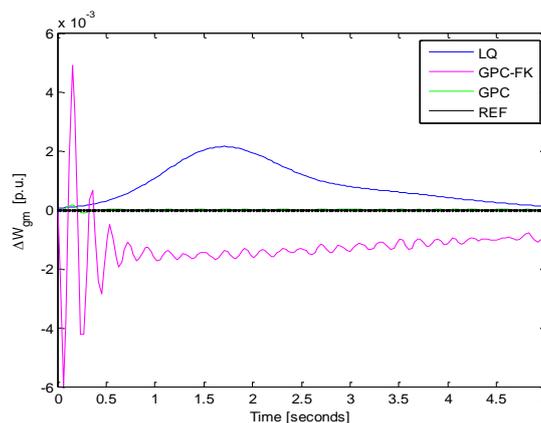
- Variación de un 20% de las referencias, desde su valor nominal.

De forma idéntica se tiene para el aspecto 2. Con las pruebas expuestas anteriormente se busca establecer cómo reacciona el sistema ante una perturbación de viento y voltaje desde la carga y visualizar características de respuesta transitoria y en estado estacionario.

### 4.2 Respuesta a escalón de viento, con Control LQ, GPC-FK y GPC.

Manteniendo en los valores nominales las referencias, la excitación es debida a un aumento en escalón la velocidad media del viento, de 16 a 17 [m/s]. El voltaje inversor y los parámetros del controlador vienen dados en Sánchez (2008). Para efectos de no aumentar el tamaño de este trabajo, solo se muestra el comportamiento de la salida de velocidad y potencias.

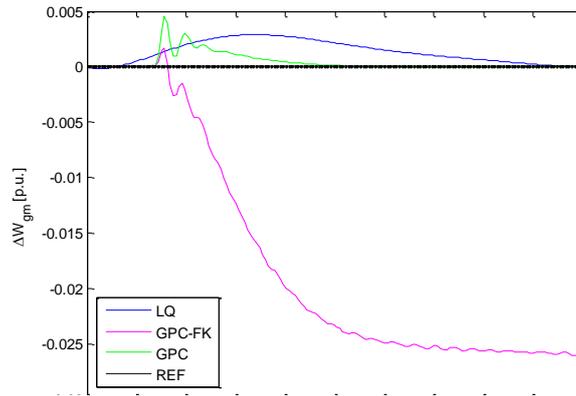
Figura 2. Velocidades angulares ejes de alta velocidad



### 4.3 Respuesta escalón de voltaje del generador eólico con Control LQ, GPC-FK, GPC.

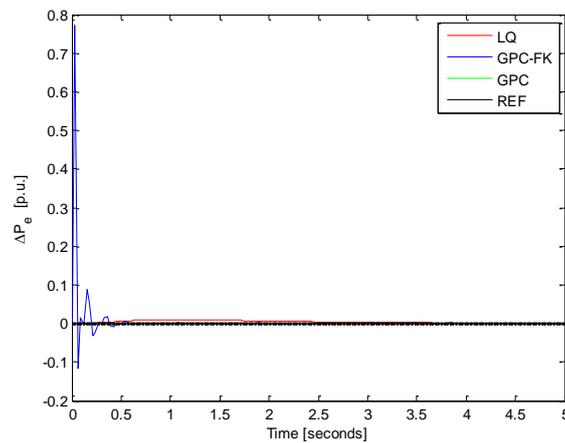
Manteniendo en los valores nominales las referencias, la excitación es debida a un aumento en escalón en el voltaje desde la carga, de 1.9 a 2.9 [pu]. La velocidad media del viento se mantiene en su valor nominal de acuerdo (Sánchez, 2008).

Figura 3. Velocidades angulares ejes de alta velocidad

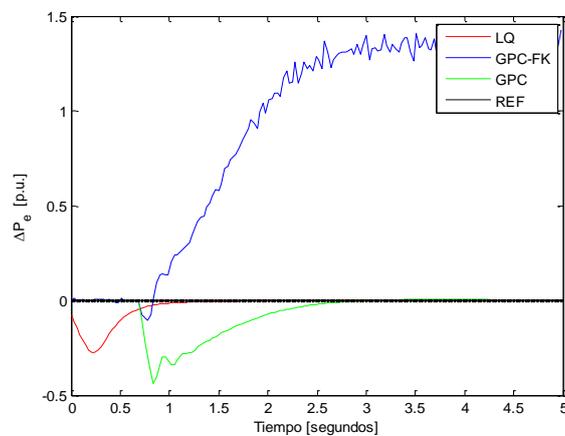


**4.4 Respuesta de las Potencias Eléctricas debido a escalón de viento y voltaje con control GPC, GPC-FK y LQG.**

**Figura 4. Potencias eléctricas debido a variación de viento**



**Figura 5. Potencias eléctricas debido a variación de voltaje de red**

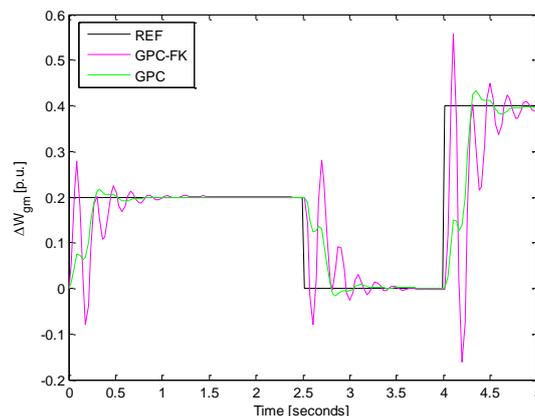


**4.5 REGULACION**

Esta prueba se realiza con el fin de evaluar, como se comporta el sistema eólico con los controladores GPC-FK y GPC, ante variaciones en las referencias, con magnitudes de un 20% y un 40 %. Entonces se realizarán variaciones en las velocidades del eje de alta velocidad.

**Caso 1.** Variaciones en el  $\Delta\omega_{gm}$

**Figura 6. Velocidades angulares ejes de alta velocidad**



## 4. Resultados y Discusión

**4.1 Análisis con perturbación desde el viento.** El comportamiento se realiza con un esfuerzo de control levemente más alto de GPC que con el control LQ, esto demuestra la capacidad optimizante de la metodología de control GPC. Para la transferencia de energía eléctrica, el mejor desempeño lo tiene GPC, con un error en estado estacionario de cero y un tiempo de asentamiento menor que el de LQ, pues la metodología LQ queda con un error en estado estacionario. En cuanto a las oscilaciones mecánicas, se acentúan con mayor fuerza con el método GPC-FK, mientras que con los otros métodos se minimizan de forma considerable.

**4.2 Análisis con perturbación desde el voltaje de carga.** El controlador que menos error en estado estacionario comete, es el GPC y nuevamente el peor desempeño lo lleva el GPC-FK. En la figura 3, las oscilaciones generadas en la velocidad del eje de alta velocidad demuestra que el sistema es muy sensible a las altas ganancias en las variables manipuladas, esto se visualiza tanto para GPC-FK como en GPC, mientras que el control LQ, otorga un comportamiento suave pero más lento. El control LQ es más suave pero más lento al mismo tiempo que GPC-FK, reaccionaba con un retardo y con una alta ganancia, lo cual hace que cometa un error en estado estacionario

**4.3 Análisis de Transferencia Energética.** Con respecto al comportamiento en la transferencia de energía, cuyo tema es el corazón de este trabajo, es necesario comentar las siguientes dinámicas, relativas a las figuras 4 y 5. En 4 se muestra que la potencia eléctrica generada a través del control GPC-FK, se eleva de forma considerable a los 0.1 [seg], puesto que el la corriente en el enlace DC se incrementa fuertemente, aquel incremento en corriente se debe a que el controlador disminuye demasiado el voltaje de campo y como compensación también disminuye en forma considerable el ángulo de disparo.

## 5. Conclusiones

Las simulaciones de las respuestas del sistema con control LQ indican que poseen una rápida reacción ante la perturbación y con tendencia al valor nominal. El responsable de este desempeño es la realimentación de los estados. Por otra parte la amortiguación en las respuestas es alta lo que permite que el sistema no sufra sobrecargas tanto en la etapa mecánica como eléctrica. En cuanto a los errores en estado estacionario cometidos por su desempeño en régimen de perturbación para el caso de las potencias eléctricas y mecánicas, se comporta muy bien, de la misma forma lo hace GPC.GPC-FK no posee un desempeño aceptable y esto se atribuye a que la estimación de los estados no ha sido bien realizada por el observador, aun considerando que es un observador óptimo. También los resultados referentes a regulación revelan que el seguimiento con GPC es mucho mejor que GPC-FK y esto se debe a que la sintonía de los pesos no fue la mejor hecha para GPC-FK, pues se sintonizaron para realizar una transferencia máxima de energía y no para regulación. Parte del comportamiento de esta dinámica, es la elección de una adecuada sintonía de las penalizaciones  $R$  y  $\lambda$  de tal forma que pueda cumplirse con los dos requerimientos, transferencia óptima de energía y seguimiento de referencia. Finalmente los resultados arrojan que el sistema de control GPC, es el mejor para ésta aplicación en comparación a los otros dos controladores.

## Bibliografía

Steinbuch M. (1989). *Dynamic Modelling and Robust Control of a Wind Energy Conversion System*. Ter verkrijging van de graad van Doctor aan de Technische Universiteit Delft.

Munteanu C., Cutululis N.A., Bratcu A. I., Ceanga E. (2005). *Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach*. Control Engineer Practice.

Uctug M.I., Eskandarzadeh I., Ince H. (1994). *Modelling and output power optimisation of a wind turbine driven double output induction generator*. IEE Proce. Electr. Pow. App.

De Battista H., Puleston P., Mantz R., Christiansen C. (2000). *Sliding Mode Control of Wind Energy Systems with DOIG Power Efficiency and Torsional Dynamics Optimization*. IEEE Trans. Pow. Sys.

Muljadi E., Butterfield C.P. (2001). *Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation*. Trans. Ind. App.

Cutululis N. A., Munteanu I., Ceanga E., Culea M. (2002). *Optimal control structure for variable speed wind power system*. Proceedings of the 11<sup>th</sup> national conference on electric drives CNAE'02, Galati, Romania.

Inoue A. (2006). *A Calculation Method of the Total Efficiency of Wind Generators*. *Elect. Eng. in Japan*. 157(3).

Stol K., Balas J. (2002). *Periodic Disturbance Accommodating Control for Blade Load Mitigation in Wind Turbines*. *J. Sol. Energy Eng.* 125 (4).

Almeida R., Lopes J. (2007). *Participation of Doubly Fed Induction Wind Generators in System Frequency Regulation*. *Power Sys. IEEE Trans. En. Conv.*

Bianchi F.D., De Battista H., Mantz R.J. (2007). *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer. New York. ISBN 1-84628-492-9.

Erlich I., Kretschmann J., Fortmann J., Mueller-Engelhardt S., Wrede H. (2007). *Modeling of Wind Turbines Based on Doubly-Fed Induction Generators for Power System Stability Studies*. *IEEE Tran.Pow. Sys.* 22(3).

Kim S. K., Kim E. S.(2007). *PSCAD/EMTDC-Based Modeling and Analysis of a Gearless Variable Speed Wind Turbine*. *IEEE Tran.En. Conv.*

Grover P.J., Huang I. (1998). *Introduccion to Random Signals and Kalman Filter*. 3era Ed.Wiley & Sons.

Camacho E., Bordons C. (1999). *Model Predictive Control*.Springer.New York.ISBN:3-540-76241-8.

Mikles J.,Fikar M. (2007). *Process, Modelling, Identification and Control*.Springer.ISBN: 978-3-540-71969-4.

Rossiter J.A. (2004). *Model-Based Predictive Control : a practical approach*. CRC Press LLC, ISBN 0-8493-1291-4.

Sánchez P. (2008). *Diseño de un Sistema de Control Optimal para un Aerogenerador que Minimiza las Perdidas en la Transferencia de Energía*. Trabajo de Título en la Carrera de Ingeniero Civil Electrónico, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Nelson Aros Oñate  
E-mail: naros@ufro.cl  
Universidad de La Frontera