

Capítulo 3

Diseño del controlador

A lo largo de este capítulo se hará la descripción del controlador utilizado en el sistema, y se revisarán a detalle las características de cada uno de los elementos que lo componen. Como se observó en el capítulo anterior, las ecuaciones que representan al generador eléctrico componen un sistema no lineal con parámetros variables en el tiempo, estas características del sistema complican su análisis. Sin embargo en una sección de este capítulo se explicará cómo es que se logra manipular este sistema en particular mediante un controlador lineal.

3.1. Características del sistema

El objetivo principal del controlador es lograr que el sistema se encuentre en cierto rango de frecuencias, dentro del cual se busca que cierto valor de frecuencia sea constante. En esta sección se describe cómo es que se obtiene el valor de la frecuencia del sistema. Por otra parte se resalta la importancia de hacer interactuar las diferentes partes que componen a todo el sistema por medio de los momentos de inercia que se generan en los periodos de tiempo para los cuales la velocidad angular del rotor se debe aumentar para compensar la caída de frecuencia debida a la conexión de alguna carga adicional.

3.1.1. Transferencia de pares

Antes de comenzar el diseño del controlador debemos analizar el comportamiento del sistema con todos los elementos interconectados. Para esto primero relacionamos los distintos componentes mediante su interacción mecánica, que puede ser descrita con las siguientes ecuaciones.

Por parte de la turbina eólica

$$T_t = T_{ext} + J_t \frac{d\omega_t}{dt} \quad (3.1)$$

donde

T_t : par de la turbina [Nm].

T_{ext} : par mecánico externo proveniente de la caja multiplicadora [Nm].

J_t : inercia de la turbina.

ω_t : velocidad angular de la turbina [$\frac{rad}{s}$].

Caja multiplicadora

$$T_{ext} = T_{CVTi}n \quad (3.2)$$

$$\omega_t n = \omega_{CVTi} \quad (3.3)$$

donde

T_{CVTi} : par que demanda la CVT

n : relación de la caja multiplicadora

ω_{CVTi} : velocidad angular de entrada de la CVT

CVT

$$T_{CVTi} = J_{CVT} \frac{d\omega_{CVTi}}{dt} + \frac{T_m}{\eta} \quad (3.4)$$

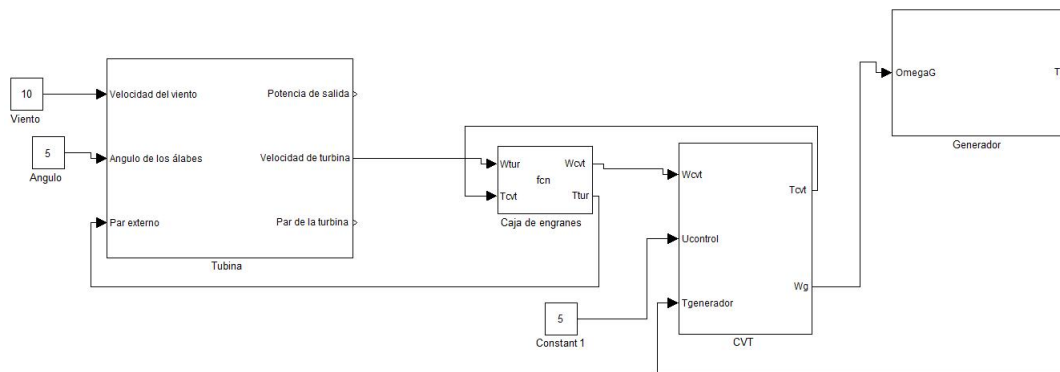


Figura 3.1. Diagrama de bloques de los elementos acoplados mecánicamente

$$\omega_{CVTi} = \omega_m \eta \quad (3.5)$$

donde

J_{CVTi} : inercia de la CVT

T_m : par mecánico que demanda el generador

η : relación variable de la CVT

ω_m : velocidad angular del rotor del generador

Por parte del generador

$$T_m = J_G \frac{d\omega_m}{dt} + T_e \quad (3.6)$$

donde

J_G : inercia del rotor del generador

T_e : par eléctrico producido por el generador

Introduciendo estas ecuaciones en Simulink para interrelacionar los elementos obtenemos el sistema completo. En la figura 3.1 se muestra el diagrama a bloques del sistema.

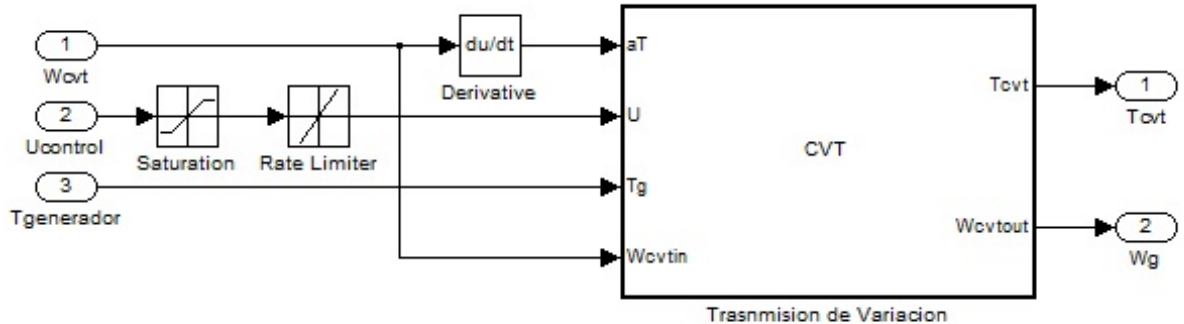


Figura 3.2. Diagrama de bloques de la CVT en la simulación del sistema

3.1.2. Operación de la CVT

La transmisión de variación continua es el componente mediante el cual se logra establecer una relación de velocidades que haga girar el rotor del generador de inducción a la velocidad suficiente para mantener la frecuencia de generación en 50 Hz. El modelo utilizado en el sistema simulado se muestra en la figura 3.2. En el diagrama de bloques se muestra un bloque que limita el rango de operación de la CVT, por medio de un saturador, que tiene límites inferior y superior de 0.7 a 2.92 respectivamente, los cuales indican la relación de velocidad mínima y máxima que puede alcanzar la CVT. Seguido al saturador se tiene un bloque que limita la rapidez de cambio de la relación de velocidad debido a que la CVT tiene un tiempo de respuesta, de acuerdo a su construcción y diseño.

3.1.3. Medición de la frecuencia

Existen diferentes métodos para medir la frecuencia de una señal. Considerando que el controlador diseñado en este capítulo puede ser utilizado en un procesamiento de señales en tiempo real, es conveniente utilizar un método eficiente en

la medición de este parámetro, el cual consume la menor cantidad de recursos en los cálculos [18].

Medición en el dominio del tiempo Aunque con este método se pueden cometer algunos errores considerables debido al contenido de ruido en la señal se tiene la ventaja de que el número de muestras para la señal no está definido, lo cual es una ayuda en el procesamiento de señales en tiempo real. Los métodos utilizados son el método de fase, el método de ajuste de datos y el método de cruce por cero.

Medición por combinación de tiempo y frecuencia Los métodos que involucran una combinación de análisis en tiempo y frecuencia son capaces de medir señales mezcladas y aunque no son precisamente para medir señales con ruido, se pueden lograr mediciones aceptables en ambientes con gran concentración de señales. Estos métodos requieren de grandes tiempos de procesamiento numérico, además de que son cálculos más complejos. Algunos de estos métodos son: la transformada de Fourier, método de la frecuencia central y el análisis de *wavelet*.

Método de cruce por cero

Considerando que en esta tesis solo se busca analizar la frecuencia fundamental de una señal de 50 Hz, para la cual la frecuencia no cambiará de forma tan rápida, el método de cruce por cero mostrado en [18], es bastante simple. Los resultados del método se muestran en la gráfica de la figura 3.3, en la medición de la frecuencia de la señal. Esta se calcula mediante la siguiente ecuación

$$f = \frac{1}{2\pi T_s} \cos^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N x(n+2)x(n) + \sum_{n=1}^N x(n)x(n)}{2 \sum_{n=1}^N x(n+1)x(n)} \quad (3.7)$$

donde

N: es el número de datos con los que se obtendrá la frecuencia.

n: es el número de muestra.

T_s : es el tiempo de muestreo.

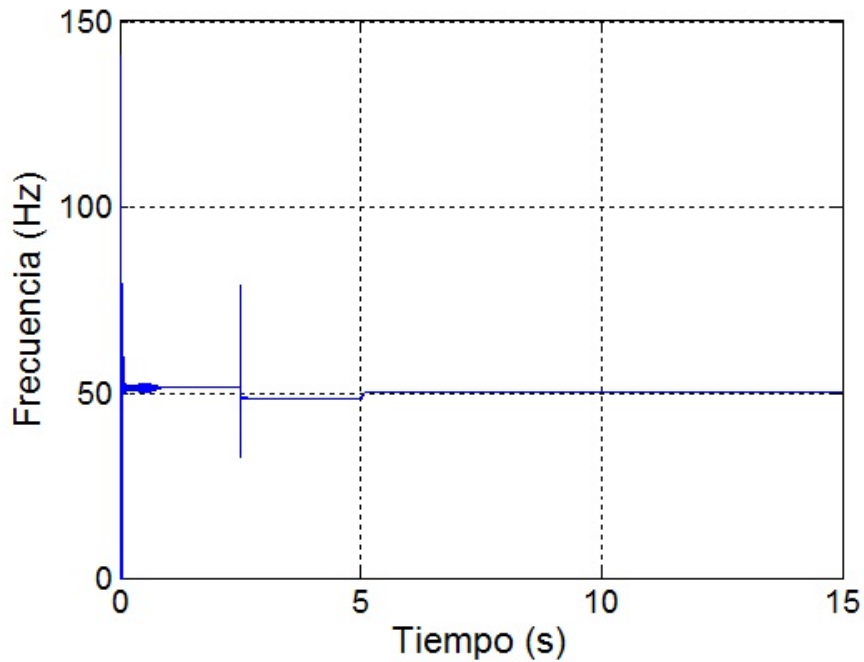


Figura 3.3. Magnitud de la frecuencia medida con el método de cruce por cero

$x(n)$: es el valor de la muestra en el tiempo presente.

para la medición simulada en esta tesis, se han considerado $N=56$, con la finalidad de reducir los efectos del ruido generado en los cambios en la frecuencia, así como también una rápida convergencia en la medición.

3.2. Control del sistema mediante la CVT

Lograr mantener la frecuencia del sistema prácticamente constante, se ha conseguido mediante el análisis de las diferentes señales con las que trabaja el mismo. Partiendo de lo anterior se han hecho consideraciones relevantes las cuales se mencionan a lo largo de esta sección. Recordando que el generador modelado en el capítulo anterior es una máquina de inducción autoexcitada, además de que la carga conectada a este mismo es una carga variable se mostrará a lo largo de la sección como se logró mantener constante la frecuencia pese a estas perturbaciones

en el sistema.

3.2.1. Señales del sistema

Como se mencionó al inicio de este capítulo, el modelo matemático del generador eléctrico utilizado es complejo, ya que implica ecuaciones no lineales en sus representación en el espacio de estados, así como parámetros que varían en el tiempo, sin embargo, dentro del estudio de este sistema se han hecho consideraciones importantes, debidas a la naturaleza de las señales que se manejan con la finalidad de simplificarlo.

Carga eléctrica

La variable que representa la carga eléctrica que se le conecta al generador tiene variaciones en el tiempo, las cuales son función directa del uso que se le dé a la energía generada. El objetivo de incorporar una CVT entre la turbina eólica y el generador de inducción ha sido obtener una señal senoidal de una frecuencia constante, y la principal perturbación que se tiene para el sistema cuando se busca eso, es la conexión de cargas que demandan una potencia mayor. Para compensar el efecto de esta perturbación, es necesario incrementar la velocidad angular del generador.

Velocidad angular del rotor ω_r

La velocidad angular a la que gira el rotor del generador de inducción es el parámetro más trascendente en el estudio realizado en esta tesis ya que por medio de él se logra variar la frecuencia de la señal de voltaje que se tiene a la salida. Aun con lo anterior, el manejar esta variable como un estado dentro del espacio de estados provoca que el conjunto de ecuaciones que describen la maquina de inducción tenga términos no lineales. Esto se puede observar en la ecuación (2.69) donde la matriz de parámetros del sistema contiene a la variable ω_r .

Esta señal tiene cambios suaves y una vez que se tiene una carga eléctrica constante no cambia. Esto se puede observar en la figura 3.4, en el tiempo $t = 5s$, donde se tiene este cambio debido a que para este instante se conecta carga al

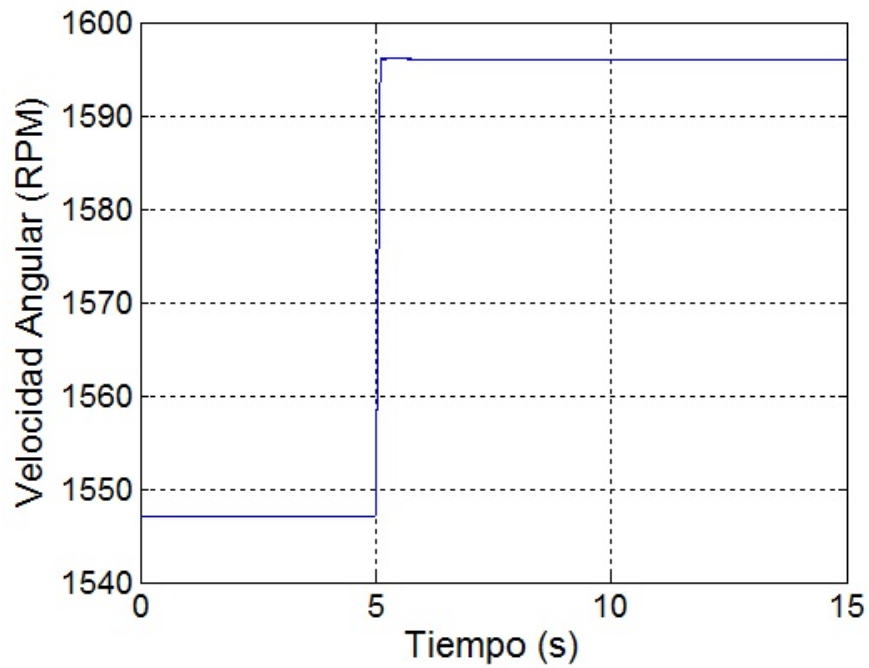


Figura 3.4. Velocidad angular del rotor del generador de inducción ω_r .

generador, para el resto de tiempo se tiene una velocidad angular constante.

Señal de viento

La velocidad del viento es una magnitud aleatoria, y el cambio de esta se da en función de parámetros como son la densidad del aire, la humedad relativa y algunos otros más. Sumando todo lo anterior, es importante resaltar que el cambio de esta magnitud, es lento en comparación con la dinámica de una máquina eléctrica, para este caso un generador de inducción. En la figura 3.5, se muestra la señal de entrada durante los primeros 15 segundos de simulación del sistema, y se puede apreciar que los cambios en esta señal son muy suaves para tiempos de algunos cuantos segundos.

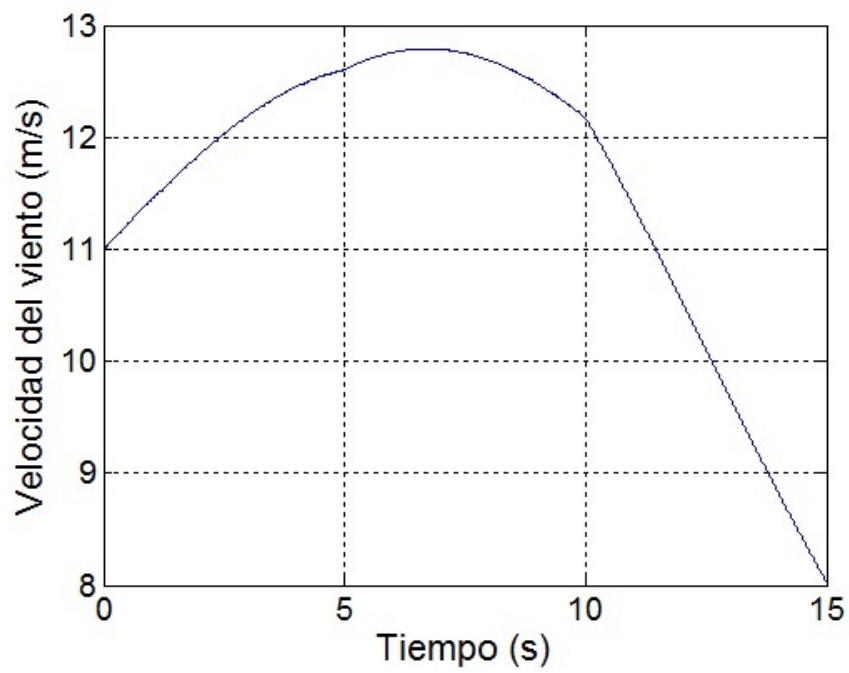


Figura 3.5. Función de viento utilizada para 15 segundos de simulación

Inductancia de magnetización L_m

Para poder simplificar parte del análisis es conveniente considerar a la inductancia de magnetización como un parámetro constante, aunque como se mencionó en el capítulo anterior se puede manejar como una función de la corriente de magnetización I_m , que es a su vez una función de las corrientes en el rotor y en el estator ($i_{qs}, i_{qr}, i_{ds}, i_{dr}$), esta se describe en la ecuación (2.60) a la ecuación (2.62). En las ecuaciones (2.63) y (2.64) se muestran los polinomios que describen la trayectoria de la inductancia de magnetización como función de voltaje y corriente. En la figura 2.16 y en la figura 2.17 se muestran las gráficas de dichos polinomios.

La inductancia de magnetización es un parámetro que se incrementa mientras el núcleo de hierro de la máquina de inducción se satura magnéticamente. Una vez que sucede esto, la inductancia de magnetización decrece, y llega a su estado estable donde permanecerá en un valor prácticamente constante, y solo cambiará cuando el generador varíe su velocidad (ω_r). Para este caso el generador de inducción, solo cambia la velocidad del rotor cuando existen cambios en la carga eléctrica conectada. En la figura 3.6 se pueden observar estos cambios, que suceden en $t = 2,5s$ y en $t = 5s$.

3.2.2. Controlador

La variable que manejaremos con la CVT (velocidad del rotor) afecta tanto a la frecuencia como a la amplitud del voltaje generado. Sin embargo estas dos variables no guardan una relación fija, es decir, a un valor de frecuencia dado no tendremos un valor de amplitud fijo, ya que esto depende las características de la máquina, así como del valor de los capacitores y la carga conectados al estator. También es importante considerar que un cambio en el valor de los capacitores no afectaría a la frecuencia pero si la amplitud del voltaje [15]. Es por esto que en esta tesis solo se pretende controlar el valor de la frecuencia sin tomar en cuenta la amplitud del voltaje generado.

Debido a las características del generador de inducción autoexcitado, debemos diseñar dos controladores; uno para comenzar la autoexcitación con la velocidad de rotor necesaria, y otro que comience a actuar cuando la carga sea conectada y la frecuencia comience a variar. En la figura 3.7 se muestra el sistema con los dos controladores.

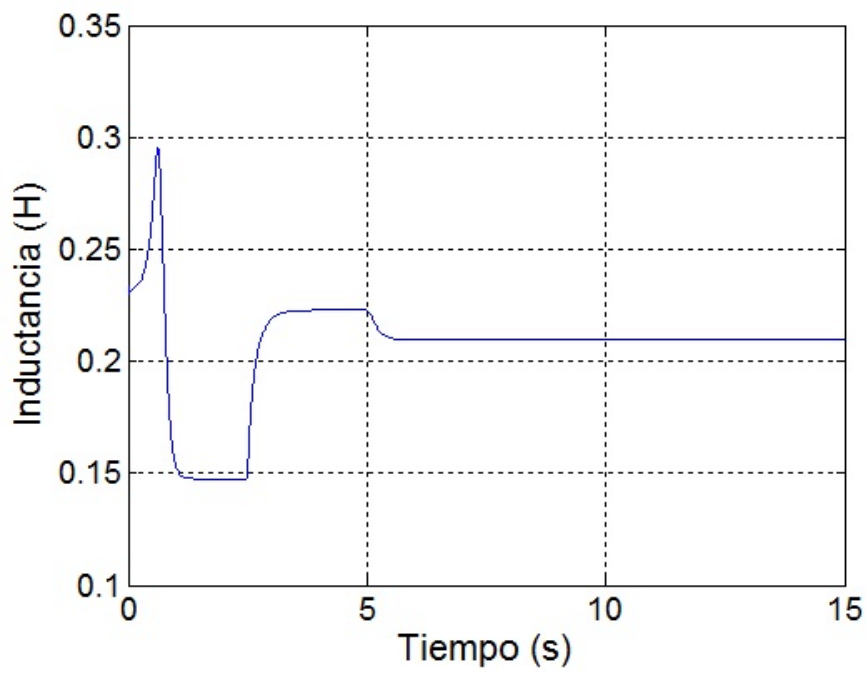


Figura 3.6. Trayectoria de la inductancia de magnetización

Controlador de velocidad de autoexcitación

Este controlador comenzará a actuar desde el inicio de la conexión de la turbina al generador. Las señales que manejará el controlador son la velocidad de entrada a la CVT y la velocidad de salida de la CVT. La referencia que se seguirá es la velocidad que necesita el generador para comenzar la autoexcitación.

Debido a que nuestra acción de control se establece con la relación dada en la ecuación (3.5), podemos implementar un control prealimentado que solo tome información de la velocidad de entrada ω_{CVTi} y con base en ésta determine la acción de control. Esto se logra dividiendo ω_{CVTi} entre la velocidad deseada.

$$\frac{\omega_{CVTi}}{\omega_{ref1}} = \eta \quad (3.8)$$

donde

ω_{ref1} : velocidad angular para comenzar la autoexcitación.

Sustituyendo (3.8) en (3.5) obtenemos

$$\omega_m = \omega_{ref1} \quad (3.9)$$

Este control también se pudo haber implementado con una estructura PI, pero resulta mejor si se combina con el control prealimentado. Esto se debe a que el actuador se llega a saturar muy rápidamente solo con la salida del control PI por el rango de valores tan estrecho (de 0.7 a 2.92) de entrada de control que maneja la CVT, por lo que no llega a responder adecuadamente. Por eso, al implementar el control prealimentado, que proporciona una acción de control que está siempre dentro de los valores que maneja el actuador (CVT), junto con un controlador PI, que corrija pequeñas perturbaciones que el control prealimentado nunca detectaría, logramos un buen desempeño. La señal que entrará al control PI será la velocidad de salida de la CVT ya que en este momento la frecuencia no nos interesa.

Cabe mencionar que las ganancias del control PI tienen que ser negativas debido a la forma en que se relaciona la velocidad de entrada y de salida de la CVT. Observando la ecuación (3.5) notamos que al aumentar la señal de control, la velocidad de salida disminuye y viceversa. Esto causa que al recibir, por ejemplo,

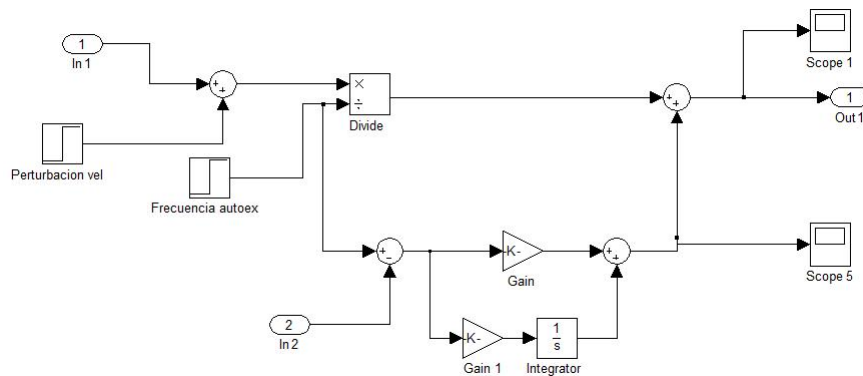


Figura 3.8. Diagrama de bloques del control de autoexcitación. Control 1 en la figura 3.7

una señal de error negativa (salida mayor a referencia), al asignar ganancias negativas al controlador, la señal de control se eleve, con lo que se disminuye la salida, acercando así la señal de salida a la referencia.

El control PI sintonizado finalmente fue

$$C_1(s) = -0,01 - \frac{0,1}{s} \quad (3.10)$$

En la figura 3.8 se observa el diagrama de bloques del controlador implementado en Simulink.

Control del generador con carga

Una vez que se ha autoexcitado el generador, conectamos la carga al mismo tiempo que el controlador de frecuencia para el voltaje que alimenta a la carga. Siguiendo la misma metodología que para el controlador para la autoexcitación, creamos un control que reciba información del sistema y a partir de ésta genere la señal de control necesaria para mantener la frecuencia constante. Las señales de entrada utilizadas en este controlador son la carga, la velocidad de entrada a la CVT, y la frecuencia de la señal a la salida. La salida del controlador es la señal de control de la CVT.

Analizando el generador en funcionamiento, podemos considerar la carga conectada al estator como la única variable no controlada. Por esta razón nuestro control prealimentado medirá el valor de la carga y a partir de esta determinará la salida de control necesaria para mantener la frecuencia constante.

Trabajando solo con el modelo del generador, se le conectaron diversas cargas y se colocó la velocidad del rotor de tal manera que la frecuencia permaneciera en 50 Hz. Con los datos obtenidos de la resistencia de carga (R) contra velocidad del rotor se obtuvo un polinomio que, en función de la carga R , da como resultado la velocidad necesaria para mantener el voltaje en 50 Hz. El polinomio que se obtuvo es el siguiente.

$$\begin{aligned} \omega(R) = & 1,2227 \times 10^{-7} R^4 - 0,5473 \times 10^{-4} R^3 \\ & + 0,009434 R^2 - 0,7812 R + 188,5646 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Introduciendo el valor de la carga conectada en este polinomio obtenemos la velocidad necesaria para mantener la frecuencia constante, la cual luego se divide entre la velocidad de entrada a la CVT, ω_{CVTi} , para obtener la relación que debe establecerse en la CVT para obtener la velocidad de salida deseada.

$$\frac{\omega_{CVTi}}{\omega(R)} = \eta \quad (3.12)$$

Sustituyendo (3.12) en (3.5)

$$\omega_m = \omega(R) \quad (3.13)$$

que es la velocidad que mantiene la frecuencia en 50 Hz.

De nuevo, como en el controlador para la autoexcitación, se agrega un control PI para que trabaje en conjunto con el control prealimentado. También se pudo haber usado solamente un control PI, pero por las mismas causas que en el controlador de autoexcitación, obtenemos un mejor desempeño con el controlador prealimentado en conjunto con el controlador PI.

En esta ocasión el control PI es más necesario, ya que al contrario del control para autoexcitación, donde solo se necesitaba mantener la velocidad de salida constante en función de la velocidad de entrada, en este caso la velocidad que se calcula en función de la carga R depende de las características del modelo del generador con el que se haya trabajado, por lo que existe mayor incertidumbre sobre el valor calculado de la velocidad de salida de la CVT. Con el control PI se podrá corregir esta deficiencia además de otras perturbaciones inherentes a los sistemas de medición.

El control PI tendrá como señal a controlar directamente la frecuencia, en vez de la velocidad de la CVT. Con esta configuración, de nuevo las ganancias del controlador tienen que ser negativas debido a que, considerando, por ejemplo, el caso en que la frecuencia sea mayor a la frecuencia de referencia, la señal de error será negativa, y al multiplicarse por las ganancias negativas, obtenemos una salida de control positiva que aumentará el valor de la relación de velocidad de entrada-velocidad de salida de la CVT η , reduciendo así la velocidad de salida y en consecuencia la frecuencia del voltaje generado. En conclusión, entre más crece una señal de error negativa (frecuencia mayor a la referencia), mas aumenta la señal de control, aumentando así la relación η que a su vez disminuye la velocidad de salida de la CVT, la cual disminuye la velocidad del rotor del generador y con esto la frecuencia.

El control PI sintonizado es

$$C_2(s) = -0,0009 - \frac{0,05}{s} \quad (3.14)$$

En la figura 3.9 se observa el diagrama de bloques del control de frecuencia del generador con carga implementado en Simulink.

Discretización del controlador

Para tener un acercamiento más real, se decidió discretizar el control y conectarlo al sistema continuo. El tiempo de muestreo que se eligió para el controlador fue de 1 ms. Para esto, a la parte del control prealimentado se le agregó un retén de orden cero de 1ms para que de esta manera la señal de salida se actualizará solo cada milisegundo, mientras que para el control PI se obtuvo su equivalente discreto utilizando la regla de Tustin, también con un tiempo de muestreo de 1ms.

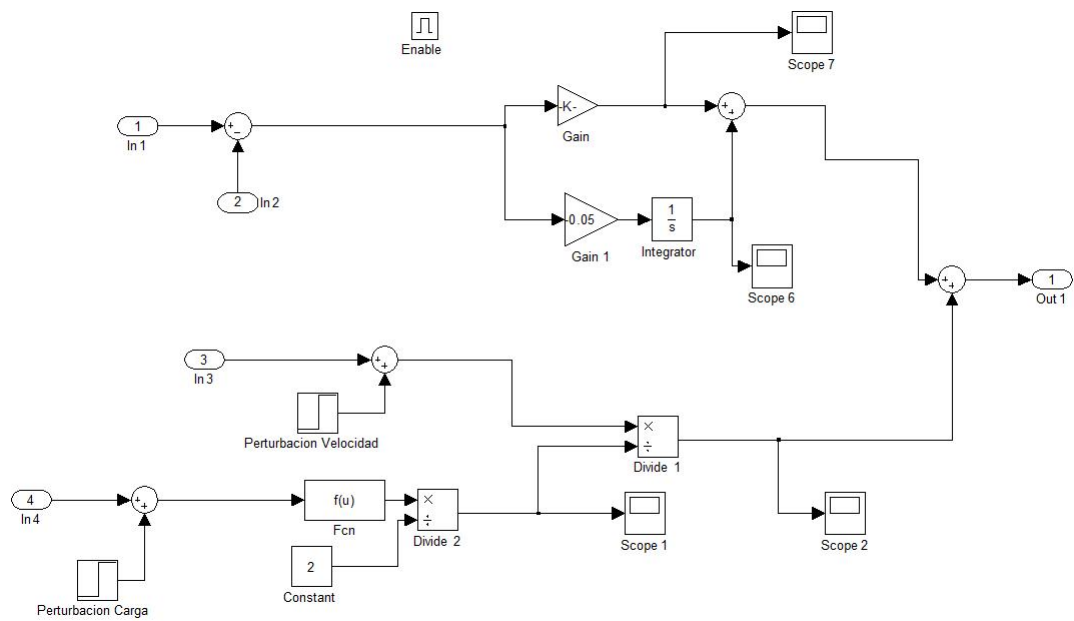


Figura 3.9. Diagrama de bloques del control del generador con carga. Control 2 en la figura 3.7

En la figura 3.10 se observa el diagrama de bloques del controlador para auto-excitación discretizado y en la figura 3.11 el diagrama de bloques del controlador de frecuencia.

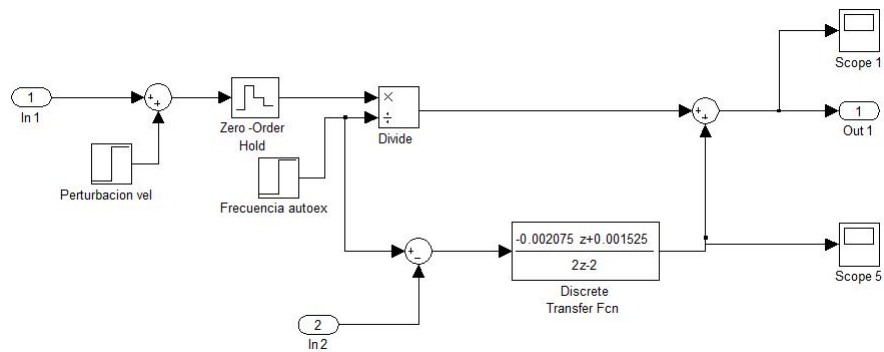


Figura 3.10. Diagrama de bloques del control de autoexcitación discretizado

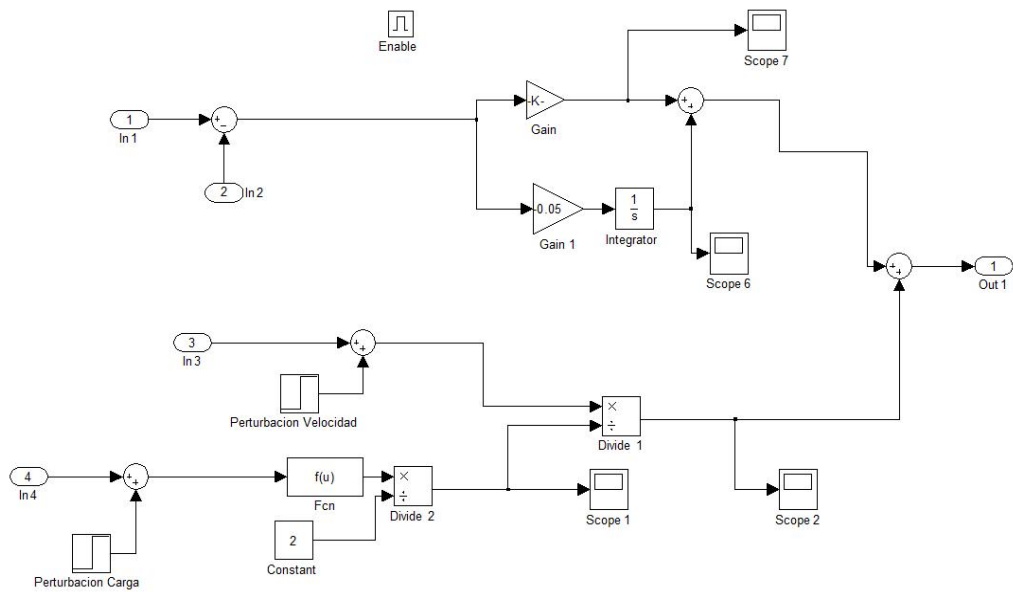


Figura 3.11. Diagrama de bloques del control del generador con carga discretizado