

Capítulo 4

Resultados de la simulación del controlador

Este capítulo se compone de tres partes de gran importancia para el análisis principal de esta tesis, la primera de ella es la unión ente la turbina eólica y la transmisión de variación continua, la segunda parte detalla las simulaciones, realizadas en la unión de la transmisión de variación continua con el generador eléctrico, finalmente se relata el desempeño general del sistema.

4.1. Acoplamiento entre la turbina eólica y CVT

Como se mencionó en el capítulo anterior, las dos variables externas que intervienen en nuestro sistema son la velocidad del viento y la carga conectada al generador. Por el lado de la turbina eólica, analizaremos como reacciona ésta ante fluctuaciones en el viento.

Con datos obtenidos del Instituto de Investigaciones Eléctricas [19] se construyó una señal de viento aleatoria con cierta cantidad de turbulencia. En la figura 4.1 se presenta la señal de viento que manejará la turbina eólica. La manera en que reacciona el rotor de la turbina ante esta señal de viento se observa en la figura 4.2. La velocidad angular sigue una trayectoria curva suave que no sigue la del viento tan rápidamente; esto debido a la inercia de la turbina que actúa como un filtro pasobajas. Esta característica de la turbina es de hecho muy conveniente para el

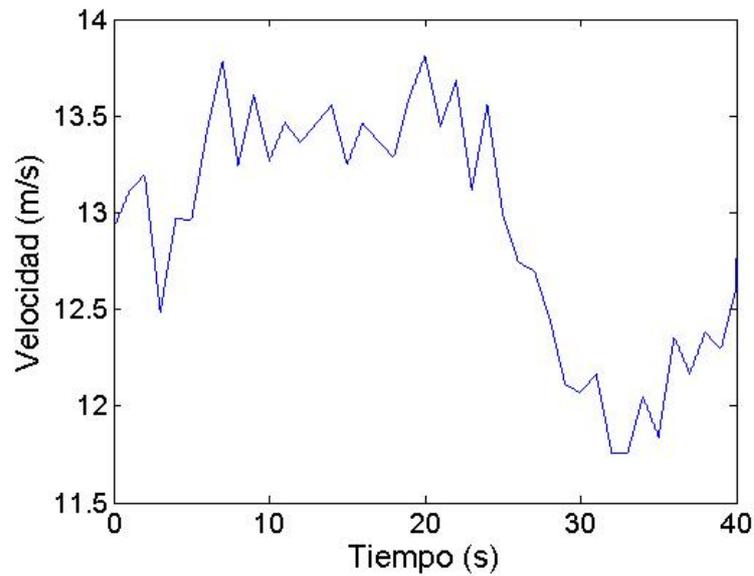


Figura 4.1. Señal de viento utilizada en la simulación

uso de la CVT, ya que con una señal lenta como esta, la velocidad de cambio de relación de radios de la CVT se ajusta suficientemente rápido.

Después de la turbina eólica se encuentra la caja de engranes, que aumentará la velocidad para que se acerque más a la que necesita el generador. En la figura 4.3 la velocidad de salida de la caja de engranes se encuentra ya en un rango razonable para que trabaje el generador. Esta velocidad será con la que trabajará la CVT para ajustarla a la que necesita exactamente el generador para trabajar a frecuencia constante.

La conexión de estos elementos también implica un intercambio de pares. El cual ahora se da en dirección contraria al intercambio de velocidad angular, es decir, de la CVT a la caja de engranes y de la caja de engranes a la turbina. El par que transmite la CVT a la caja de engranes proviene del generador, solo que éste tiene variaciones debido a los cambios que maneja la CVT que afectan tanto la velocidad de salida como el par que trasmite, ya que si se cambia la velocidad de salida también tiene que cambiar el par de salida para mantener la potencia. El par que trasmite la CVT a la caja de engranes se muestra en la figura 4.4.

El par que maneja la caja de engranes también aumenta de nuevo al transmitirse a la turbina. Esto se muestra en la figura 4.5. Comparando el par con el

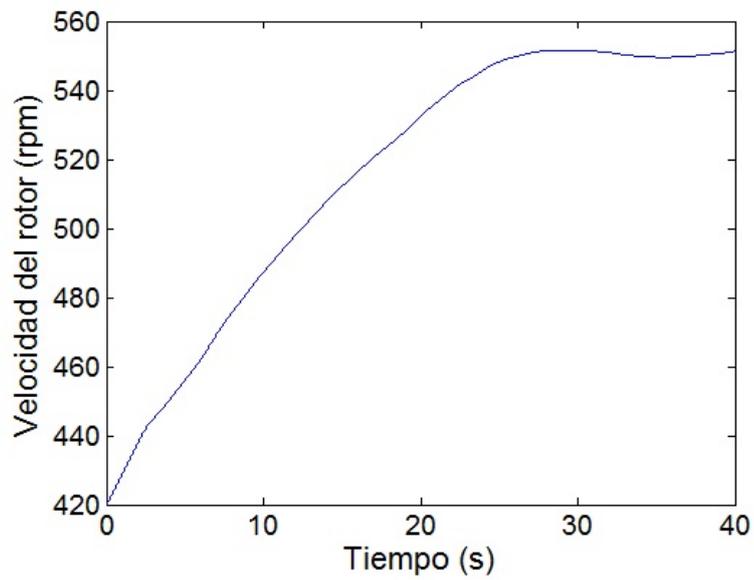


Figura 4.2. Velocidad angular del rotor de la turbina eólica

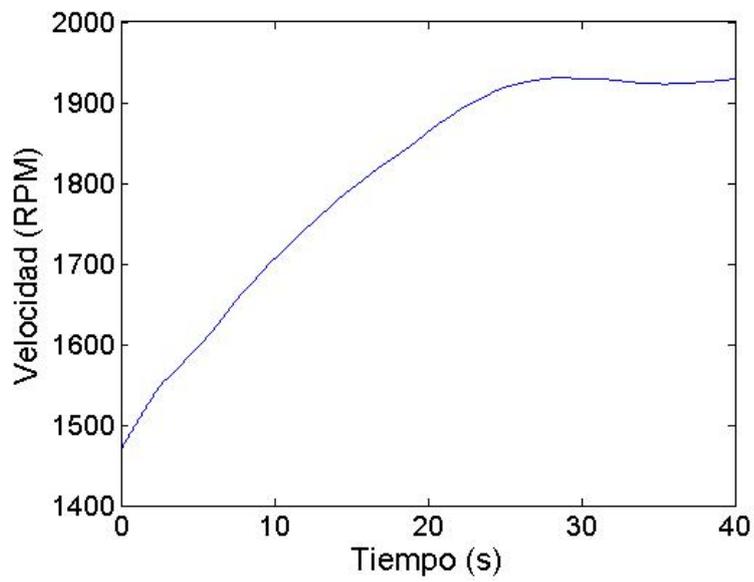


Figura 4.3. Velocidad de salida de la caja de engranes

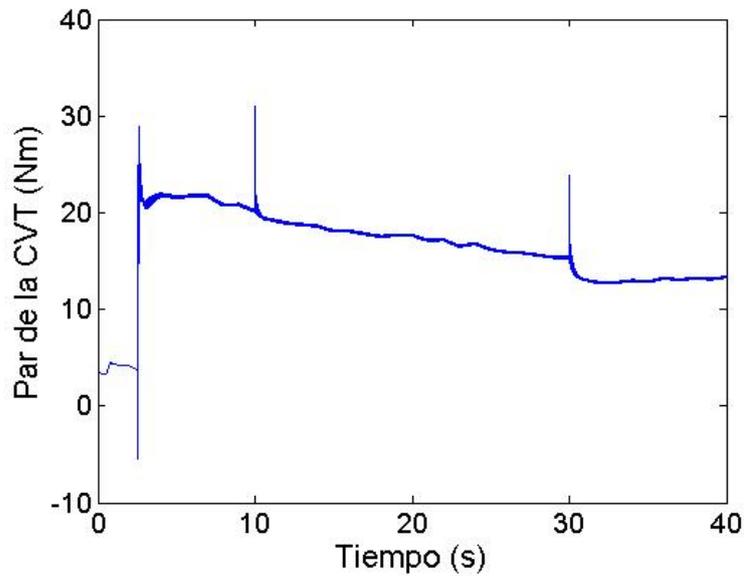


Figura 4.4. Par transferido de la CVT hacia la caja de engranes

de la figura 4.4, notamos que es el mismo, solo que escalado por la relación que maneja la caja de engranes de 3.5. Este es el par que finalmente tendrá que vencer la turbina y que determinará la velocidad angular de la misma.

En la figura 4.6, la potencia de la turbina presenta cambios muy bruscos. Esto se debe a que el modelo calcula la potencia en función de la velocidad del viento al cubo. Comparando la potencia con la velocidad del viento también se observa que las trayectorias que siguen son muy parecidas.

El par que genera la turbina con esta velocidad de viento se muestra en la figura 4.7. También sigue la trayectoria del viento debido a que el viento actúa directamente sobre los álabes que a su vez transmiten el par, aunque su velocidad angular no cambie. Pero a pesar de este comportamiento complejo, mientras la velocidad del viento tenga un promedio de aproximadamente 12 m/s la velocidad angular siempre se mantendrá en un promedio estable como se observa en la figura 4.8. Si el par que desarrolla la turbina es mayor que el par que le transmite la caja de engranes la velocidad angular irá en aumento, y cuando el par de la turbina sea menor la velocidad angular irá en decremento; pero esto de manera muy lenta, lo que provoca que con una velocidad del viento con cierto promedio, la velocidad angular se mantenga muy estable. Con una velocidad de 12 m/s la turbina genera un par de aproximadamente 100 Nm, mientras que el par que transmite la caja de

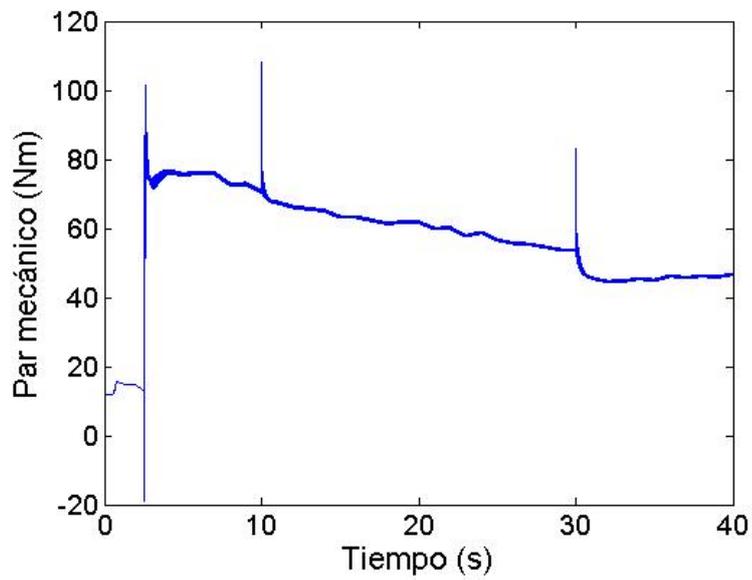


Figura 4.5. Par transferido de la caja de engranes hacia la turbina

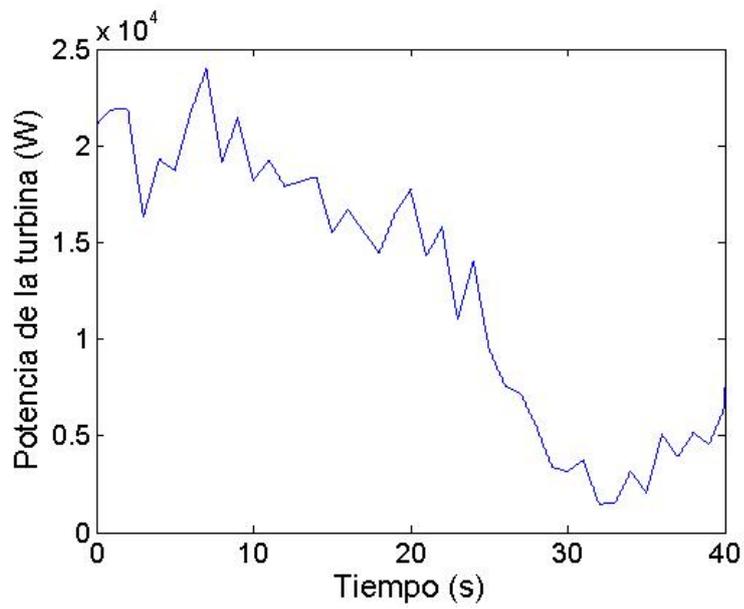


Figura 4.6. Potencia de la turbina

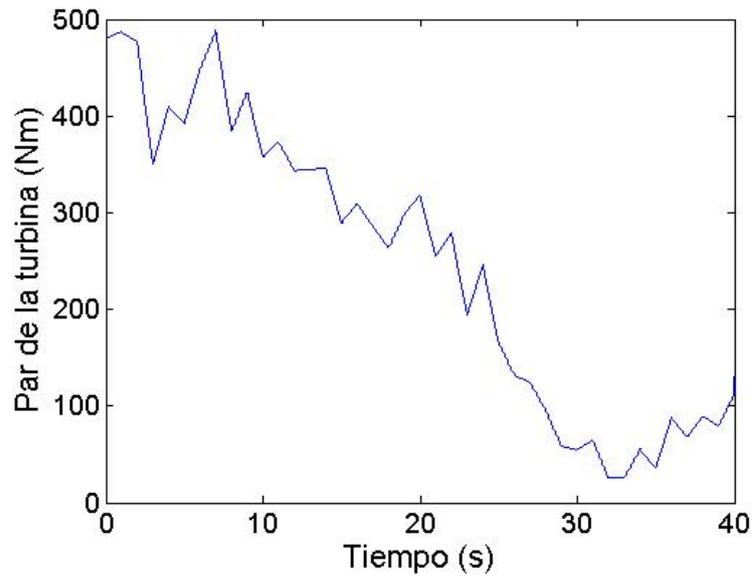


Figura 4.7. Par de la turbina

engranajes es de aproximadamente 70 Nm. Es por esto que con la velocidad promedio de 12 m/s, la velocidad angular de la turbina se comienza a estabilizar.

4.2. Acoplamiento entre CVT y generador eléctrico

La manera en que interactúan estos dos elementos depende de las características mecánicas de ambos, pero principalmente de las características eléctricas del generador, ya que finalmente el par mecánico que demanda el generador está en función de la demanda de potencia (corriente) y es este par el que se transmite hasta la turbina, afectando el comportamiento del sistema entero.

Para la prueba del sistema se simula primero la autoexcitación del generador de 0 a 2.5 s, tiempo en el cual actúa el control de velocidad de autoexcitación. Después se conecta una carga resistiva de 50 Ω en 2.5 s, que es cuando también comienza a funcionar el control de frecuencia. En 10 s la carga cambia a 45 Ω y en 30 s finalmente cambia a 40 Ω .

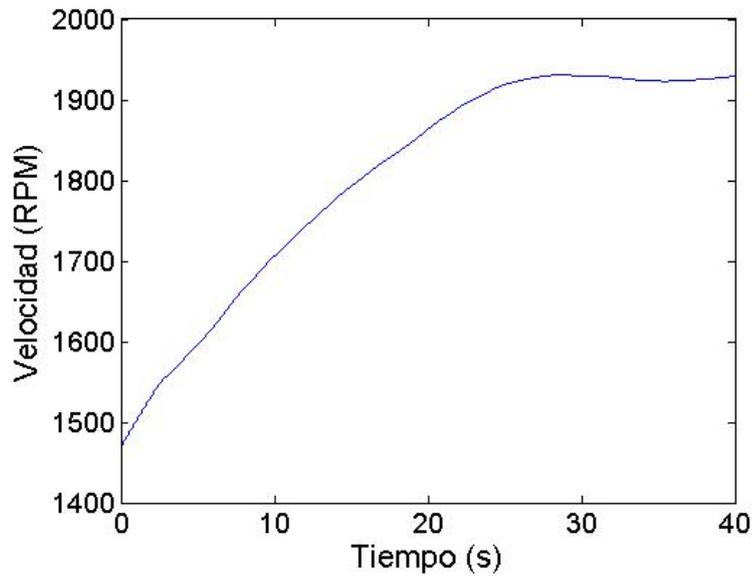


Figura 4.8. Velocidad angular del rotor

Primero analizaremos la interacción mecánica de estos dos elementos y después veremos como afecta ésta en la generación de energía eléctrica.

Debido a que la inercia del rotor del generador es muy pequeña, no influye demasiado en el par que éste demanda. En este caso la carga que se conecta al generador es la que determina la corriente y por ende el par eléctrico. En la figura 4.9 se observa que el par aumenta en 2.5 s, que es cuando se conecta la carga. Antes también existe un par, pero es muy pequeño ya que solo se debe a la corriente de excitación.

Los otros cambios importantes que vemos en el par son en $t=10s$ y en $t=30s$, que es cuando la carga aumenta. A pesar de que la carga aumenta, el par disminuye, debido a que la corriente disminuye también. La corriente que se genera también está en función de la velocidad del rotor. Es por esto que, si la carga aumenta la corriente no aumenta necesariamente. Este par es el que tiene que soportar la CVT y es el que después pasa a la caja de engranes.

El par que se transmite a la caja de engranes se mostró en la figura 4.4, que es muy parecido al par que demanda directamente el generador, pero con pequeñas diferencias debidas a los cambios de velocidad de la CVT.

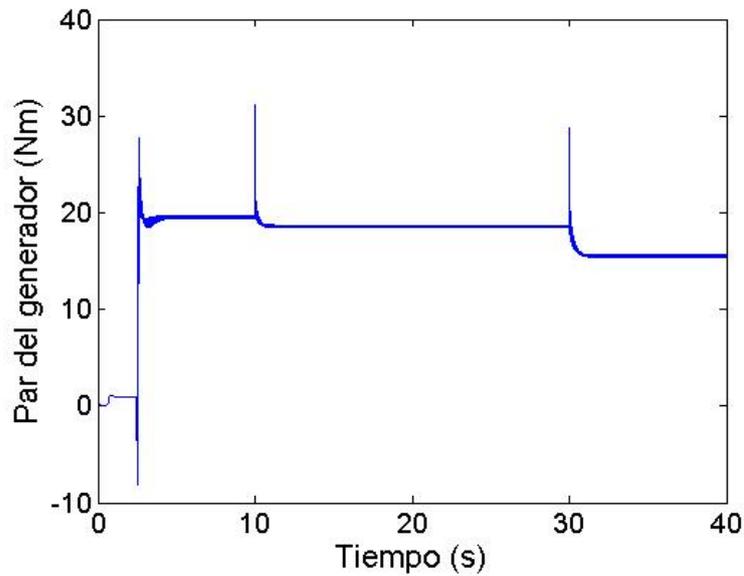


Figura 4.9. Par transferido hacia el rotor del generador

La velocidad de entrada que recibe la CVT de la caja de engranes aparece en la figura 4.3, que sigue la trayectoria de la velocidad del rotor de la turbina. Esta velocidad está entre las 1500 y 1900 RPM, mientras que la velocidad que necesita el generador ronda los 1550 RPM, dependiendo de la carga. El controlador de velocidad de autoexcitación primero se encarga de mantener constante la velocidad en 1547 RPM. Se colocó un error de medición al sistema de 20 RPM en la velocidad de entrada. En la figura 4.10 podemos ver que la velocidad manejada por la CVT se estabiliza rápidamente, manteniendo la velocidad para la autoexcitación.

Después, en 2.5 s, se conecta la carga al generador y al mismo tiempo el controlador de frecuencia. En esta parte se agregan perturbaciones en la medición de la velocidad y de la carga. El valor de velocidad que calcula el control prealimentado es de 1579 RPM. Por el efecto de las perturbaciones este cálculo es erróneo, pero con el control PI, que recibe directamente la señal de frecuencia, se logra corregir la velocidad de salida hacia el valor real que es de 1595 RPM. En la figura 4.11 se observa de nuevo como se alcanza rápidamente la velocidad deseada.

Cuando se cambian los valores de carga conectada al generador se repite el mismo proceso; el control prealimentado calcula el valor de velocidad necesario para mantener la frecuencia en 50 Hz en función de la carga, mientras que el control PI corrige los errores de cálculo causados por perturbaciones en las mediciones.

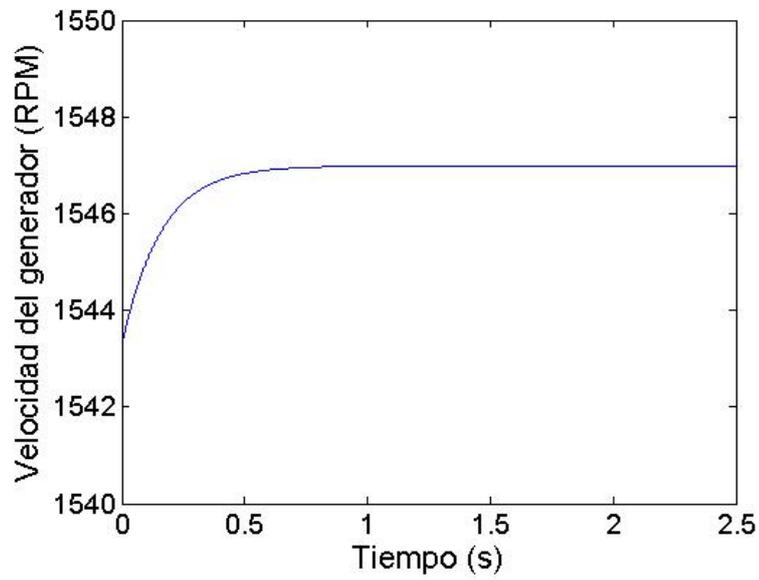


Figura 4.10. Velocidad de la CVT transferida al generador, periodo [0-2.5] s

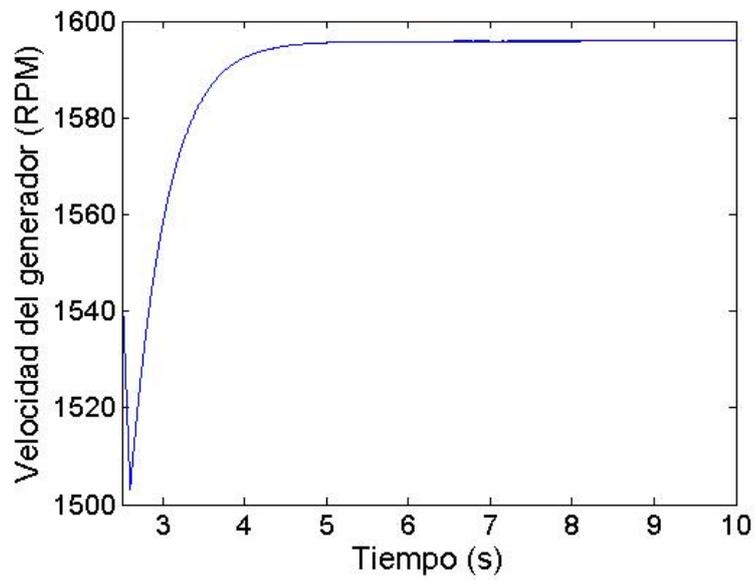


Figura 4.11. Velocidad de la CVT transferida al generador, periodo [2.5-10] s

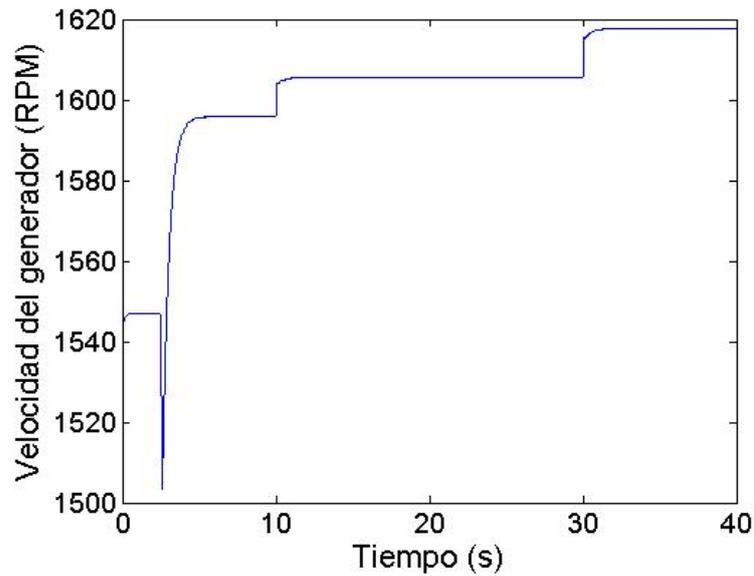


Figura 4.12. Velocidad de la CVT transferida al generador

En la figura 4.12 se muestra el patrón de velocidad que transmite la CVT hacia al generador. Los valores cambian en 2.5 s, 10 s y 30 s, que es cuando ocurren cambios en la carga del generador.

Cabe mencionar que el control PI no solo corrige errores causados por la medición de las variables, sino que también errores por diferencias físicas entre el modelo con el que se calculó el control prealimentado y la máquina en la que se aplica el control prealimentado, es decir, si la máquina con las que hacen las pruebas para determinar que velocidad se requiere para mantener la frecuencia constante con distintos valores de carga, tiene valores de inductancia y resistencia de estator diferentes a los de la máquina a la que se aplicará el control prealimentado, el control PI también puede corregir los errores que aparecen debido a estas diferencias. Entre más parecidas sean las características del modelo y de la máquina real, será mejor el funcionamiento del control prealimentado.

La señal de control que genera el control se observa en la figura 4.13. Los tiempos en que ocurren las discontinuidades en la señal de control coinciden con los tiempos en los que cambian la carga del generador, ya que se tiene que mantener una velocidad de salida diferente para mantener la frecuencia constante en cada valor de carga.

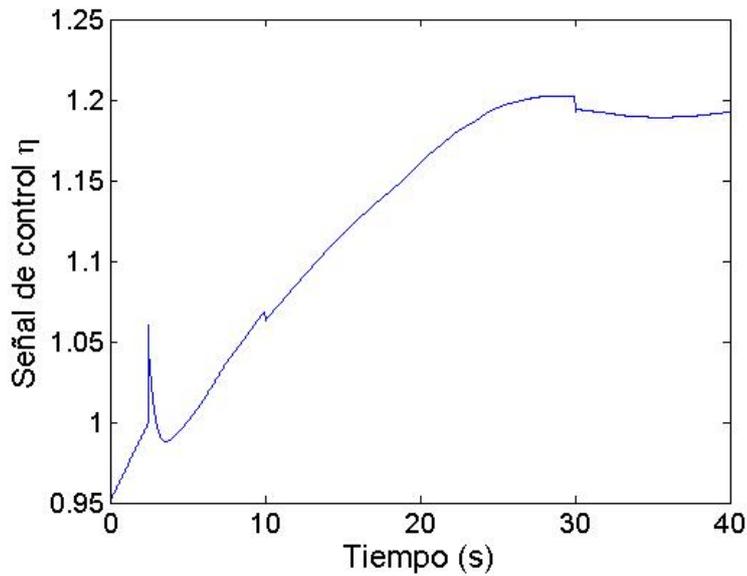


Figura 4.13. Trayectoria de la señal de control

Por la parte eléctrica, la respuesta del generador con esta entrada de velocidad de rotor provoca que la frecuencia se mantenga estable en 50 Hz con los distintos perfiles de carga, como se puede ver en la figura 4.14. Haciendo un acercamiento a 50 Hz, se observa que el error en la frecuencia es de menos de 0.1 Hz, y que el transitorio que ocurre en los cambios de carga dura menos de 0.5 s. Esto se muestra en la figura 4.15 y 4.16.

Pero como se mencionó al inicio del capítulo 3, la amplitud del voltaje no permanece constante. El voltaje generado se observa en la figura 4.17. Al inicio, en el proceso de autoexcitación, el voltaje se eleva hasta los 420 V pico, y en cuanto se conecta la carga este baja hasta los 311 V para después disminuir con los siguientes cambios de carga. Si se aumentara la velocidad del rotor, también aumentaría la amplitud, pero la frecuencia cambiaría. El detalle del voltaje trifásico generado se muestra en la figura 4.18.

Con el voltaje generado y la carga que se conectó al generador se mantiene la corriente de la figura 4.19. A diferencia del voltaje, la corriente se mantiene muy estable en un valor de aproximadamente 6 A pico. El detalle de la corriente trifásica se muestra en la figura 4.20.

La potencia que se llega a obtener del generador manteniendo la frecuencia

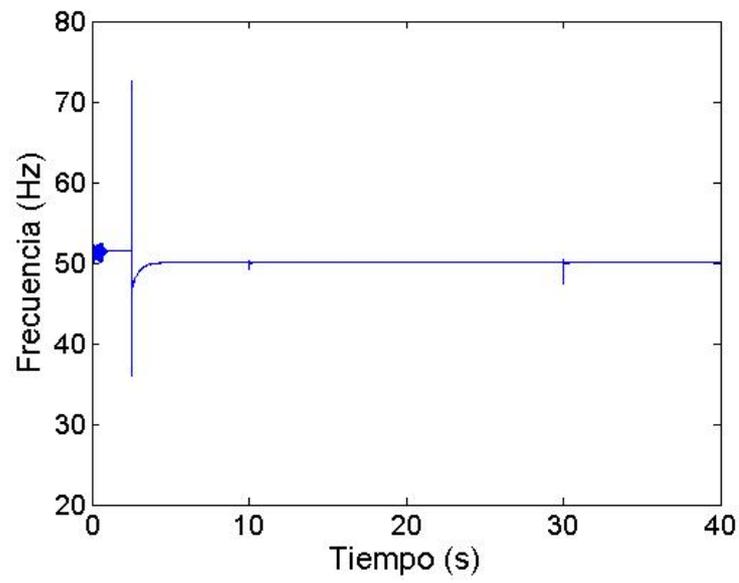


Figura 4.14. Frecuencia de la señal de voltaje generada

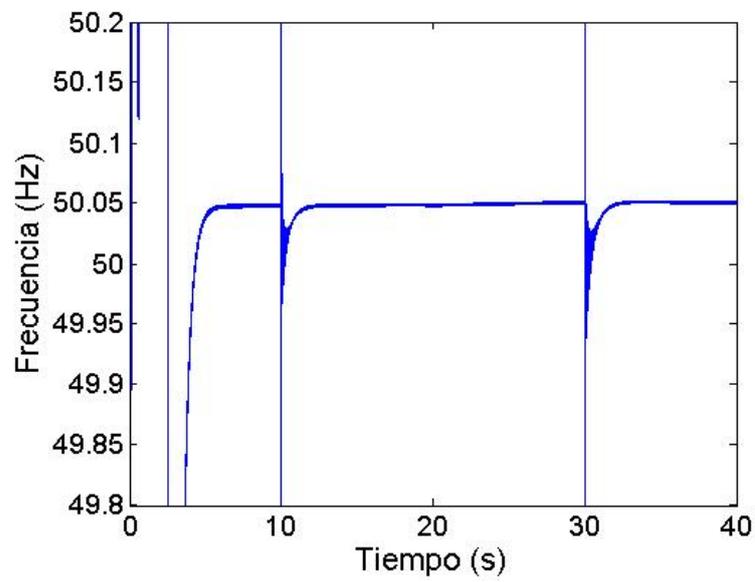


Figura 4.15. Detalle de la señal de frecuencia

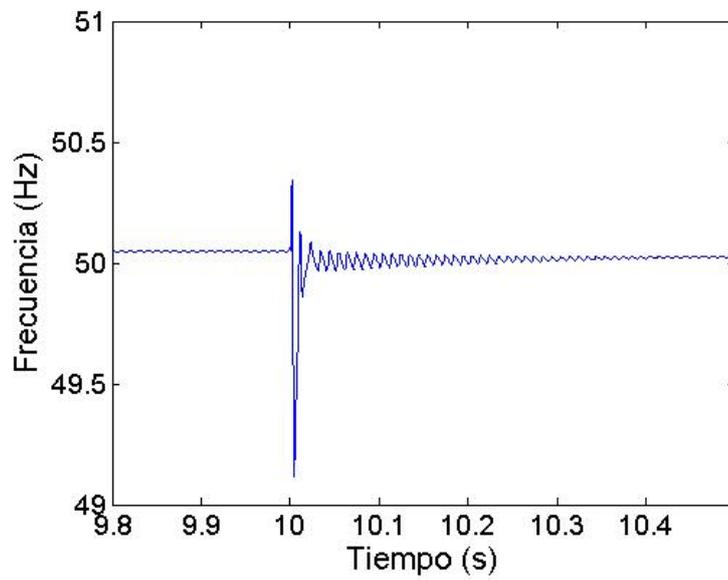


Figura 4.16. Detalle de la señal de frecuencia

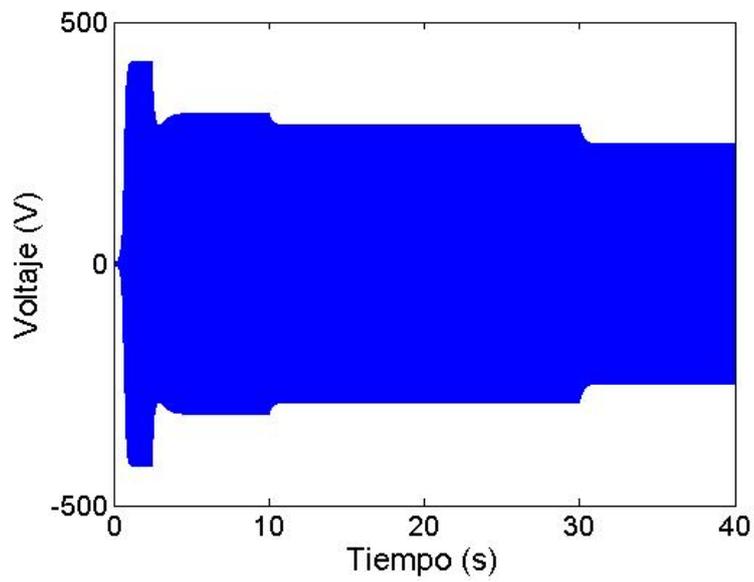


Figura 4.17. Voltaje del generador

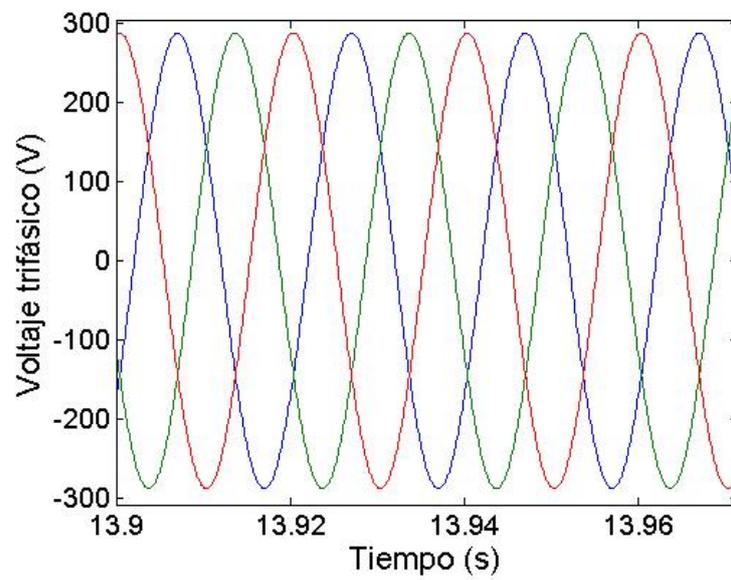


Figura 4.18. Detalle del voltaje del generador

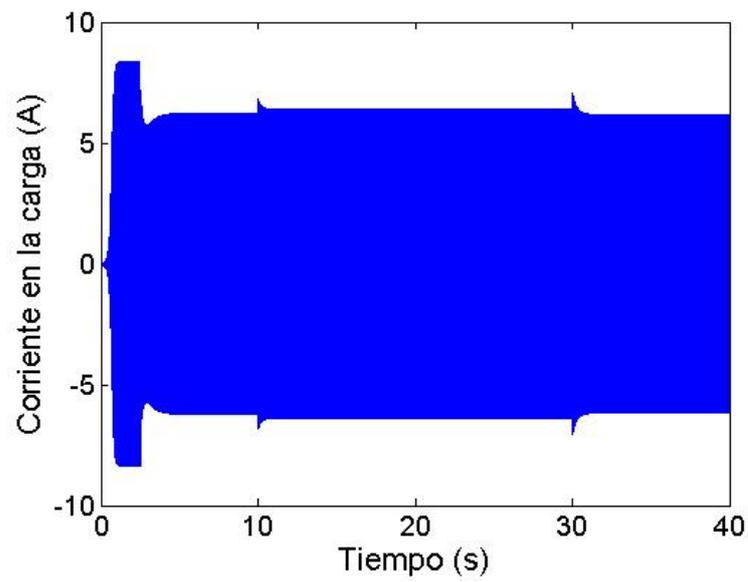


Figura 4.19. Corriente del generador

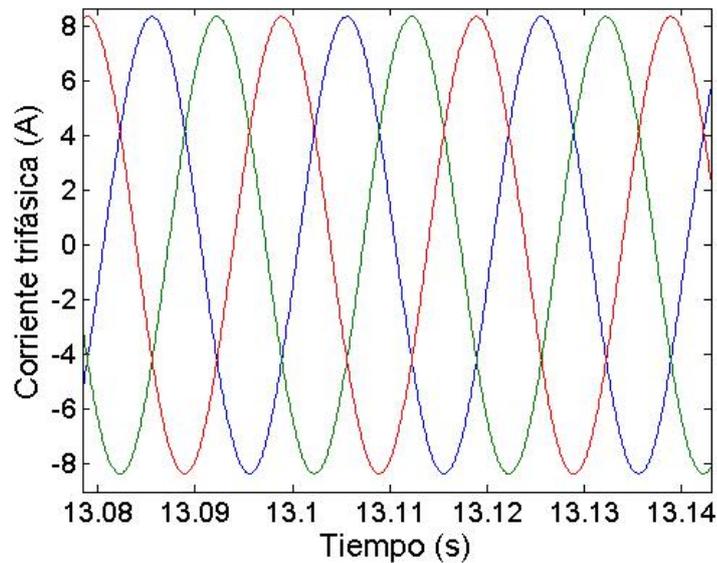


Figura 4.20. Detalle del corriente del generador

constante se observa en la figura 4.21. Con los valores de carga y capacitancia manejados la potencia se mantiene entre 2 y 3 kW. La potencia depende también en gran medida del valor de la capacitancia. Si esta llega a aumentar hasta los $100\mu\text{F}$, la potencia llega a alcanzar los 8 kW con los mismos valores de carga. Obviamente el valor de la corriente y el voltaje también aumentarían, además del par eléctrico. Pero al cambiar los parámetros de la máquina se tendría que calcular la velocidad necesaria para mantener la frecuencia constante con dichos parámetros, y después crear el control prealimentado con estos datos.

El par eléctrico que se genera está estrechamente relacionado con la potencia (figura 4.21). El par aparece con signo negativo debido a que se trata del par demandado por el generador.

El comportamiento de la inductancia de magnetización se observa en la figura 4.22. Durante el tiempo de autoexcitación comienza a crecer hasta estabilizarse. Después con cada incremento de carga también aumenta la inductancia de magnetización, debido a que el campo magnético también debe ser mayor para mantener el voltaje.

Cuando se conecta al sistema el control discreto con tiempo de muestreo de 1 ms, la respuesta es prácticamente la misma que con el control continuo. Como se

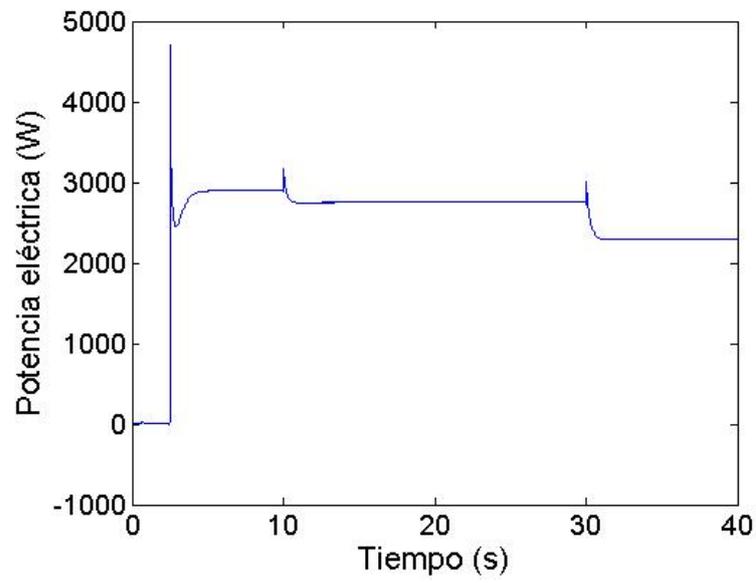


Figura 4.21. Potencia del generador en frecuencia constante

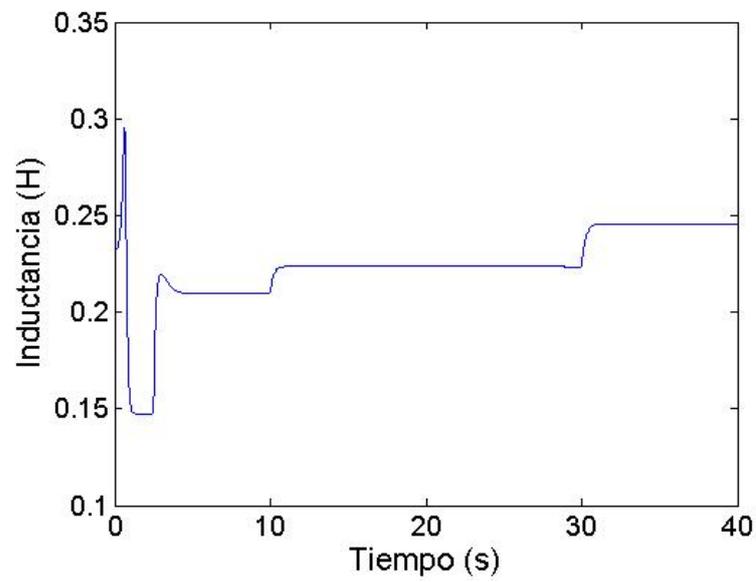


Figura 4.22. Inductancia de magnetización

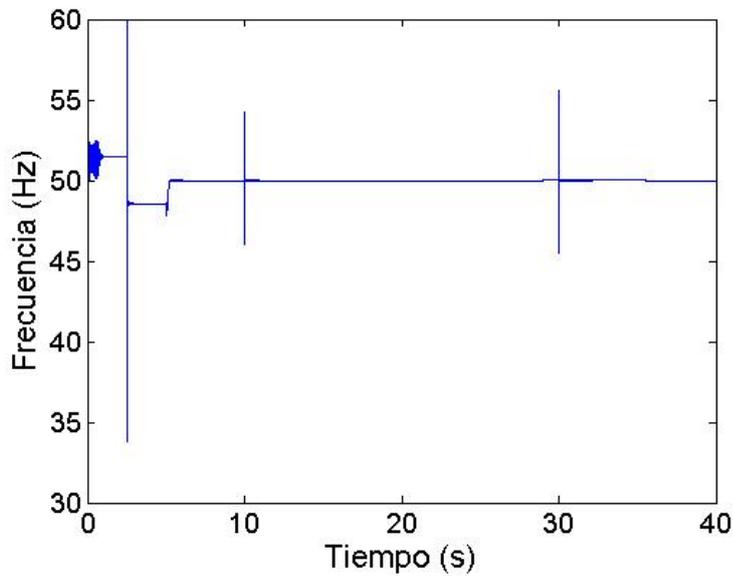


Figura 4.23. Frecuencia medida con el control digital

puede comprobar en la figura 4.23, la frecuencia se sigue controlando muy bien y el comportamiento del sistema con el control discreto no cambia con respecto al sistema con control continuo.

4.3. Desempeño general del sistema

La CVT es la parte esencial para lograr el cometido de mantener la frecuencia constante a pesar de cambios en las señales externas a nuestro sistema, la velocidad del viento y la carga eléctrica. Mientras que el par que se crea en la turbina debido al viento pueda vencer el par demandado por el generador nuestro sistema puede seguir funcionando.

La CVT trabaja tomando en cuenta las dos variables no controladas de nuestro sistema. Mientras que realiza ajustes en la velocidad de entrada proveniente de la turbina, también cambia la velocidad de salida dependiendo de la carga conectada al generador. Como se pudo observar en las pruebas realizadas, la velocidad de cambio de la CVT es lo suficientemente rápida como para reaccionar a los cambios, tanto del viento como de la carga, manteniendo la frecuencia en valores muy

aceptables.

La potencia que se obtuvo es relativamente baja, pero cambiando el valor de los capacitores conectados al estator, esta puede incrementarse considerablemente. Al hacer estos cambios hay que cuidar que tanto la capacidad eléctrica del generador, como la capacidad mecánica de los elementos no se rebasen.

Un factor importante que no se tomó en cuenta en la simulación es la resistencia mecánica de los materiales. La estructura que debe soportar a todos los elementos debe poder resistir los esfuerzos mecánicos que se generan. Para generadores de tamaño pequeño, como el manejado en la simulación, esto no es un problema tan grande, pero conforme la potencia del generador va aumentando es un factor que hay que tener muy en cuenta.

4.4. Convertidor de voltaje

El principal problema del control diseñado es la falta de control sobre la amplitud del voltaje. Debido a que nuestro control solo maneja la velocidad del rotor del generador para controlar las variables de salida (voltaje y frecuencia), no se pueden controlar dichas variables de manera independiente. A pesar de que se podría calcular el valor de capacitancia necesaria para que a cierto valor de carga se mantuviera el voltaje que deseáramos, al cambiar la carga el voltaje también variaría. Es necesario tener control sobre otra variable del sistema para poder controlar la frecuencia y la amplitud del voltaje al mismo tiempo.

El control de la variación tanto de la frecuencia como de la amplitud del voltaje en los sistemas de generación de pequeña y mediana capacidad se suele hacer mediante el uso de reguladores de voltaje (AVR). Otras estructuras han sido propuestas, como el uso de transformadores con múltiples derivaciones, pero la superioridad de los reguladores de voltaje ha hecho que estos sean los más usados en la industria.

Los reguladores de voltaje utilizan componentes electrónicos para regular el voltaje suministrado en la carga con base en las mediciones de voltaje, es decir, se utiliza un control en lazo cerrado para el control de las variables. En [20] y [21] se muestran algunas técnicas para la regulación del voltaje. En la literatura podemos encontrar una gran diversidad de algoritmos y configuraciones para lograr la regulación del voltaje generado. Algunos de estos métodos solo se encargan de regular la amplitud del voltaje mientras que la frecuencia del mismo sigue sin

control. En esquemas como el anterior, un uso en conjunto con el sistema propuesto en la tesis resultaría apropiado.

La principal desventaja de estos sistemas es su alto costo. Sin embargo, al tener la frecuencia controlada en el sistema, la complejidad de la solución del problema disminuye, y por lo tanto el costo de dicha solución.

