



Desarrollo de control electrónico para operación eficiente para turbina de viento con resistencia

Diseño Eólico y Solar S. de R.L.

Ave. Paseo de los Leones 2935

Col. Cumbres 5to

Monterrey, NL, México

Tel: (52) 81 83 00 42 86

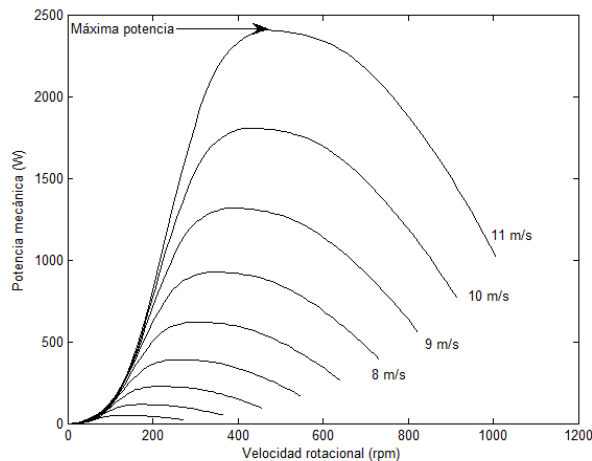
Monterrey, nuevo León 2009

Introducción

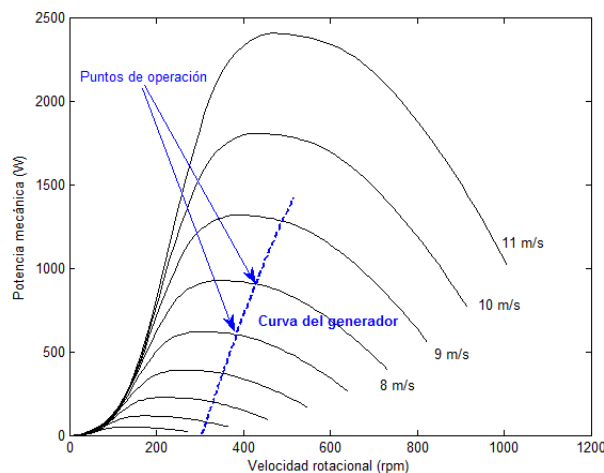
La industria eólica a pequeña escala ha tenido un auge importante en los últimos años. Sin embargo, la falta de estandarización y de normas para estos productos ha hecho que cada uno tenga características específicas y que, por ende, cada uno deba realizar su propia estrategia de control. Una de las razones por la cual no se ha podido lograr esta estandarización son las múltiples variables que entran en juego en el desempeño del aerogenerador desde la aerodinámica de las aspas, hasta la topología del generador y la regulación de la energía.

En el presente caso se utiliza una turbina de viento Aeroluz Pro que tiene un generador de imanes permanentes de flujo axial y rectifica mediante puentes de diodos. Las aspas utilizadas tienen una aerodinámica diseñada para lograr valores de C_p arriba de 0.4 para un rango alto de velocidades típicas.

Para cada velocidad de viento, existe una velocidad rotacional específica en la cual la potencia que se extrae del viento es máxima. Esto se observa claramente en una gráfica de potencial aerodinámico vs velocidad rotacional, con la velocidad de viento como parámetro:



Si el banco de baterías se conecta directamente, los puntos de operación de la turbina no pasa por los puntos de máxima potencia por lo que se desperdicia energía. Además, cuando el viento es bajo, la turbina opera prácticamente libre hasta que alcanza el voltaje del banco, por lo cual opera a una velocidad típica muy alta (velocidad rotacional alta) y es muy ruidosa.



La curva de generador mostrada en la figura anterior representa la configuración de 48V. Sin embargo esta curva puede moverse a la izquierda disminuyendo el voltaje en las terminales del generador, o a la derecha aumentándolo. Los casos extremos corresponden a la turbina en corto circuito (voltaje cero) que requiere grandes potencias incluso a baja velocidad rotacional, y la turbina en circuito abierto (voltaje libre) que implica baja potencia para alta velocidad rotacional.

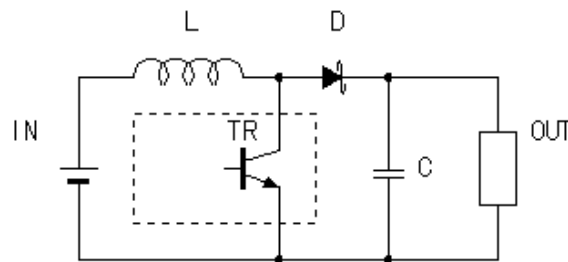
Objetivo

El objetivo del presente proyecto es regular la velocidad rotacional de una turbina de viento dependiendo de la velocidad rotacional instantánea y la potencia instantánea que genera. Esto se hace con el fin de que a bajas velocidades de viento se comience a producir energía, se pueda seguir la curva de máxima potencia aerodinámica y se abra la posibilidad de implementar un frenado por “Stall” activo.

Desarrollo

Convertidor DC/DC

Para lograr lo anterior se utiliza un convertidor DC/DC tipo “Boost”. Estos convertidores tienen el siguiente esquema típico:



Consisten en una inductancia y un diodo en serie entre la entrada de voltaje (el generador) y la salida (el banco de baterías), así como un transistor en paralelo entre el positivo y el negativo de la entrada.

La idea general del funcionamiento consiste en conectar cerrar el transistor rápidamente, de tal forma que los cambios de corriente (di/dt) carguen el inductor, y al abrir el transistor, el inductor se descarga, entregando su energía a la salida en un voltaje más alto. Así, aún si se conecta un banco de baterías de 48V, el generador puede ver un voltaje de 20V en sus terminales que en ciertas condiciones representa un mejor desempeño aerodinámico.

A diferencia de los convertidores DC/DC típicos, en el presente caso el voltaje de salida será constante mientras que se desea controlar el voltaje en la entrada. Esto implica un cambio radical en la conceptualización de estos elementos.

Otro aspecto importante a señalar, es que no habrá necesidad de utilizar un inductor nuevo, ya que las bobinas del generador eléctrico servirán como el inductor del convertidor. Esto es un aspecto clave, ya que de lo contrario tendría que utilizarse un inductor muy grande que sea capaz de soportar altas corrientes.

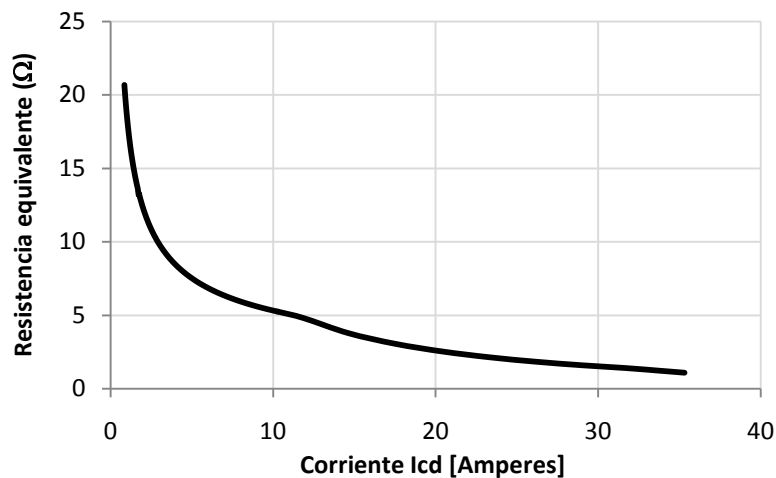
Simplificación del proyecto

Para simplificar el proyecto, como primera etapa se propone sustituir el banco de baterías por una resistencia de 20Ω que tiene una curva de operación con menos variables (en las baterías hay que incluir estado de carga, número de trayectorias en

paralelo y otras variables). El utilizar una resistencia también evita la necesidad de utilizar el diodo del convertidor, lo que elimina posibles fuentes de error en este proyecto.

Con este cambio, para el presente proyecto en lugar de variar el voltaje aparente de la turbina, ahora se modifica la resistencia aparente al cambiar el "Duty Cycle" del transistor.

La resistencia óptima para que la turbina opere en el punto de mayor eficiencia aerodinámica depende de la velocidad del viento. No obstante, un análisis demuestra que se puede hacer una relación entre la resistencia óptima y la corriente en DC que produce la turbina. La relación comienza en una resistencia de 20 Ω cuando la corriente es cero, y disminuye conforme la corriente aumenta:



Para una explicación del origen de esta curva se puede consultar el reporte de Sebastián Strady. La resistencia equivalente puede transformarse fácilmente en un DutyCycle para el transistor.

Microcontrolador

Para controlar la compuerta del transistor se utilizó un microcontrolador PIC16F873A. Este microcontrolador se eligió ya que cuenta con dos características muy útiles para el presente proyecto:

1. Cinco entradas de convertidor Análogo/Digital
2. Dos salidas PWM



Evidentemente este no es el único microcontrolador que cuenta con estas características y se invita a proponer otros para mejoras al proyecto.

Sensor de corriente

De lo anterior también es evidente la necesidad de un sensor de corriente. Para ello se utilizó un sensor de corriente ACS755 que soporta una corriente máxima de 100 Amperes y entrega a la salida un voltaje entre 0 y 5 V proporcional a la corriente según la ecuación:

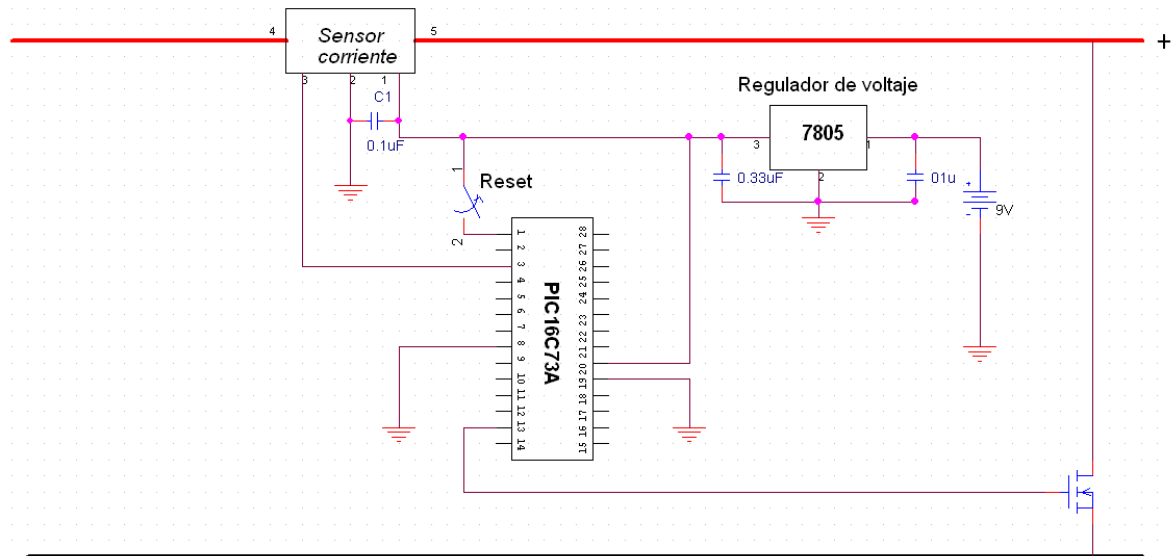


Transistor

El transistor utilizado fue un XXXXX que puede soportar una corriente de 100 Amperes y un voltaje de 100 Volts, suficiente para los fines del proyecto.

Esquema del convertidor

Los elementos del convertidor se conectan de la siguiente forma:



La operación es la siguiente

1. Se utiliza un regulador LM 7805 para convertir el voltaje de una fuente externa (en el diagrama de 9V) para suministrar energía al sensor de corriente y el microcontrolador en 5 V.
2. La corriente producida por la turbina pasa por el sensor y es leída
3. El voltaje de salida del sensor de corriente es leída por una de las entradas A/D del microcontrolador. Este voltaje será dado en fracciones y este es directamente proporcional a la corriente.
4. Dependiendo del voltaje leído en la entrada el programa generara un PWM que es conectado directamente al MOSFET. Este producir el corto circuito que frena controladamente la turbina y regula la corriente que se este generando.

El documento "Modelo dinámico de generador y controlador" explica la forma en que interaccionan el generador y el controlador, y como se pueden realizar simulaciones al respecto.

Funcionamiento del programa

En el anexo A se muestra el programa utilizado en el microcontrolador en lenguaje ensamblador. El funcionamiento de éste se explica a continuación:

1. La primera etapa del programa consiste en leer el voltaje de salida del sensor de corriente. Debido a que el módulo del PIC encargado de la conversión análogo

digital es de 10 bits, se tienen 1023 números para guardar el valor. Esto implica una resolución de $5 \text{ V} / 1023 = 4.8 \text{ mV}$. Por simplicidad se toma la resolución como 5 mV para los siguientes cálculos.

La siguiente tabla muestra la relación entre la corriente que entra al sensor, el voltaje que sale del sensor y entra al microcontrolador y el valor digital que se registra. Se muestra también el valor decimal para simplificar las referencias

I (A)	V _{RA1} (Volt)	Digital	Decimal
0.000	0.615	0001111011	0123
0.125	0.620	0001111100	0124
0.250	0.625	0001111101	0125
...
124.875	4.995	1111111110	1022
125.000	5.000	1111111111	1023

Esta tabla indica, por ejemplo, que si la corriente que produce la turbina es de 0.25 Amps, el sensor entregará 0.625 Volts y esto será cambiado a 0001111101b (125 decimal) por el convertidor análogo digital.

- Una vez que el PIC completó la conversión a digital, el valor se guarda en un registro. Para cambiar el valor correcto del amperaje transforma el valor leído mediante la ecuación:

La resta de 123 se debe al offset del sensor de corriente. Como se observa en la tabla, si se lee un valor de 123, en realidad la corriente es cero amperes. Por otra parte, la división entre 8 se debe a la resolución del convertido análogo digital que como se observa en la tabla es de 1/8 de Ampere. Es decir, si el valor de la conversión aumenta en 1 (por ejemplo, de 124 a 125) en realidad la corriente solamente aumento 1/8 de Ampere.

- Una vez obtenido el dato correcto de la corriente se guarda el valor en el registro AMP y se calcula la resistencia ideal mediante las siguientes ecuaciones (para una explicación ver trabajo de Sebastián Strady):

- Si el valor de corriente va de 0 a 2 A.

$$R = 3 * AMP^2 - 7.9375 * AMP + 30.4375$$

- Si el valor de corriente va de 3 a 5 A.

$$R = 0.3125 * AMP^2 - 3.75 * AMP + 18.5625$$

- Si el valor de corriente va de 6 a 10 A.

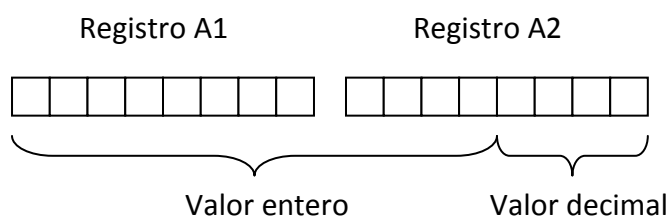
$$R = 0.0625 * AMP^2 - 1.1875 * AMP + 12.5625$$

- Si el valor de corriente va de 11 a 14 A.
 $R = -0.25 * AMP + 8.5$
- Si el valor de corriente va de 15 a 20 A.
 $R = -0.25 * AMP + 6.8123$
- Si el valor de corriente va de 21A o más
 $R=2$

Para generalizar, escribiremos la ecuación como:

“A”, “B” y “C” tomarán los valores dependiendo del rango en el que se encuentre la corriente. Estos registros, no obstante, deberán de contener 2 bytes (16 bits) para permitir escribir valores decimales. Así, los últimos cuatro Bits de los registros representan los valores 2^{-1} , 2^{-2} , 2^{-3} y 2^{-4} .

Por ejemplo, el valor de A se guarda en los registros A1 y A2 de tal manera que los 8 bits de registro A1 y los primeros 4 del registro A2 guardan el valor entero (entre 0 y 4095) y los últimos cuatro el valor decimal.



La siguiente tabla resume la relación entre los últimos cuatro bits y el valor decimal correspondiente

Últimos cuatro dígitos en Registro	Valor decimal
0000	.0000
0001	.0625
0010	.1250
0011	.1875
0100	.2500
0101	.3125
0110	.3750
0111	.4375
1000	.5000
1001	.5625
1010	.6250
1011	.6875
1100	.7500
1101	.8125

1110	.8750
1111	.9375

Al hacer este cambio se respetan las operaciones aritméticas, aunque se debe ser cuidadoso al tomar en cuenta la posición del punto “decimal” en la operación.

Por ejemplo, la ecuación del rango entre 0 y 2 A podría escribirse como:

O en decimal:

Es decir, $A2 = 00110000$, $B2 = 01111111$, $C1 = 00000001$ y $C2 = 11100111$

En este caso, los registros A1 y B1 se dejan en cero.

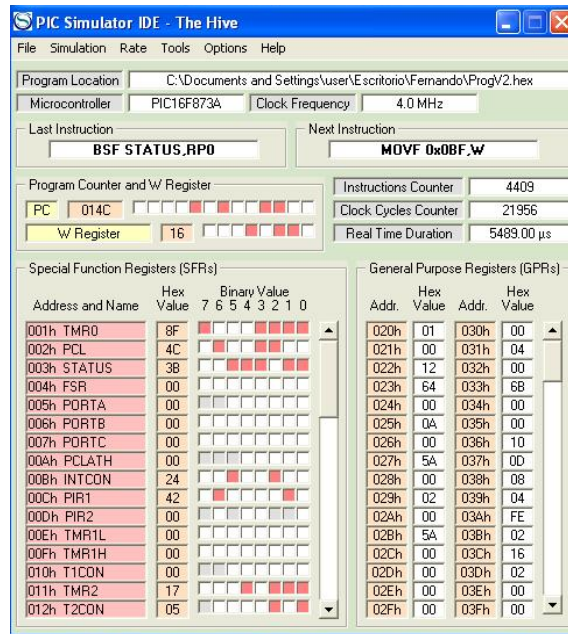
4. De los anteriores cálculos se obtiene el valor de R en Ω . Como el valor máximo de R es de 20Ω y una resolución de 1Ω es suficiente para comenzar, no es necesario utilizar dos registros para la resistencia. Por ello, el valor de la resistencia obtenido es redondeado y se guarda en un solo registro llamado “RESIS”.
5. Se calcula el Duty Cycle (ciclo de trabajo) por medio de la siguiente fórmula y se guarda en un registro llamado “DUTY”

Este valor es el que decidirá el porcentaje del tiempo en que estará encendido el transistor en el controlador

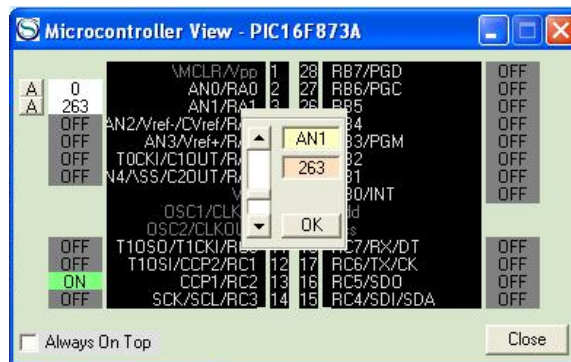
6. El PWM funciona por Hardware, así que determinando los valores del Duty Cycle y la frecuencia en los registros correspondientes seguirá funcionando hasta que se modifiquen.

Simulación Etapa 1

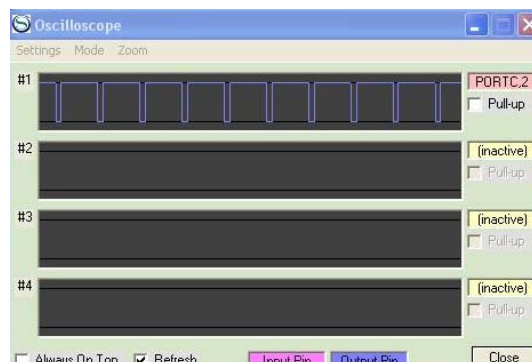
Para la simulación del programa del PIC se utilizó el Software PIC Simulator IDE, en donde se verificó que los datos de cada operación y la respuesta final fueran los correctos.



Se utilizó este programa ya que con él se puede ingresar entradas analógicas:

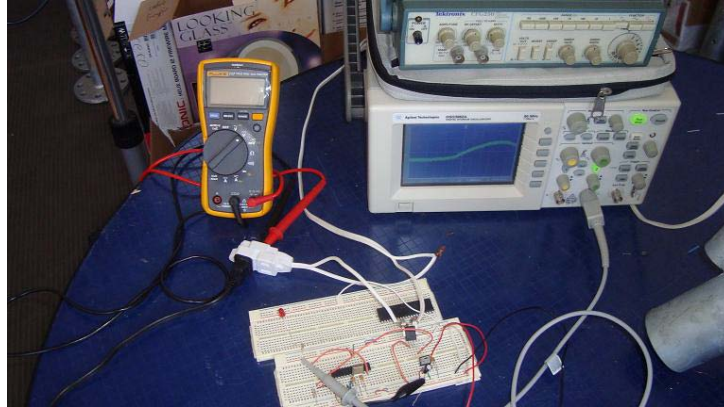


Para poder apreciar el PWM que el programa genera se utilizó el osciloscopio que el simulador trae integrado.



Pruebas Etapa 1

Una vez verificado que la simulación funciona correctamente se procede a conectar todos los circuitos involucrados en un protoboard con el fin de probarlos ya implementado al sistema de una turbina eólica.

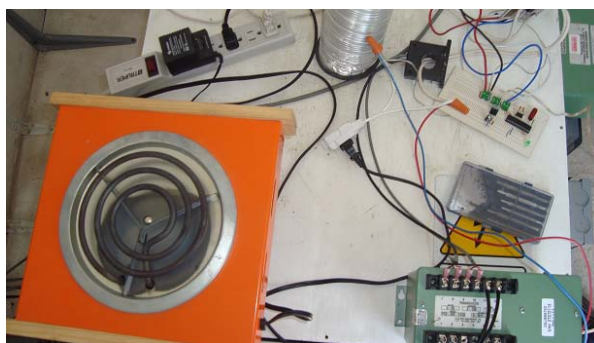


Se observó en osciloscopio y multímetro los resultados deseados y se procedió a probar con una turbina para ver su comportamiento.



Los resultados fueron los esperados y se pudo observar que el PWM funcionaba correctamente. Posteriormente se hicieron los ajustes finales tanto al programa como al proto y se construyó una tarjeta electrónica con el fin de ir al campo a implementar el sistema en una turbina en funcionamiento.

En la instalación en campo, para la resistencia de $20\ \Omega$ se utilizó una pequeña estufa eléctrica. Las siguientes fotografías muestran algunas partes de la instalación en el terreno Aeroluz:



Una vez instalado el controlador, se conectó un DataLogger para adquirir los dato que permitirían registrar la nueva curva de potencia de la turbina. Las mediciones se realizaron por un lapso de una semana.



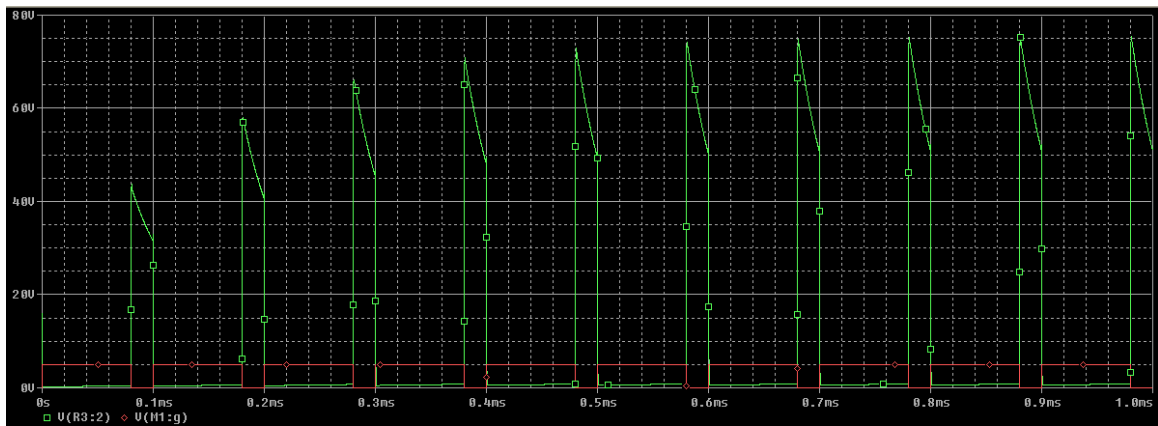
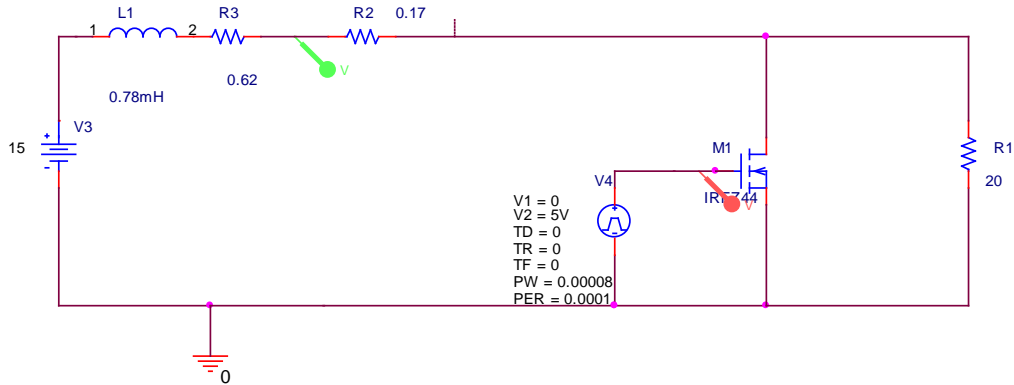
Resultados

El sistema no funcionó correctamente. El problema se debió a que al utilizar cambios drásticos en la corriente (di/dt altos), la inductancia del generador provoca picos de voltaje muy altos ya que:

—

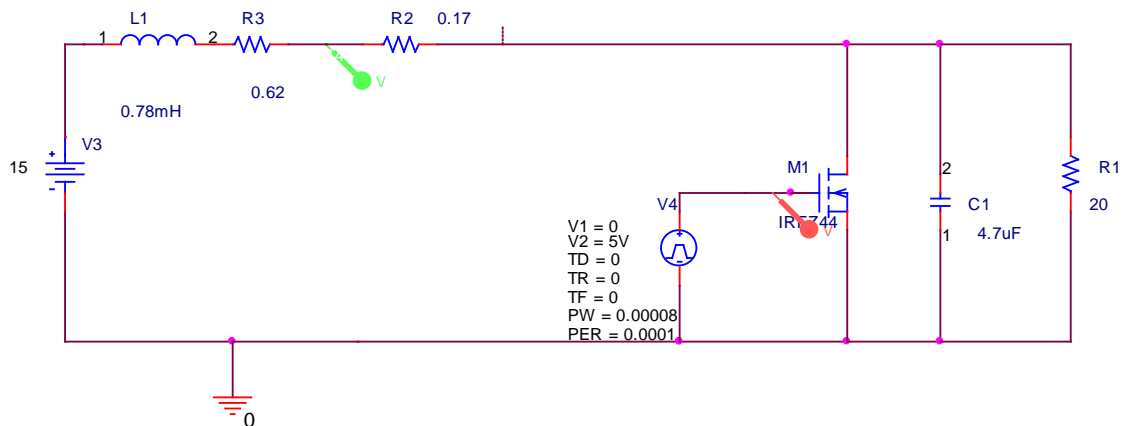
En una situación normal esto sólo generaría problemas a largo plazo, pero en el presente caso, la turbina Aeroluz Pro incluye un sistema de freno de vacío, que pone a la turbina en corto circuito cuando se detecta un voltaje superior a los 70 Volts (ya que normalmente la turbina estaría suelta).

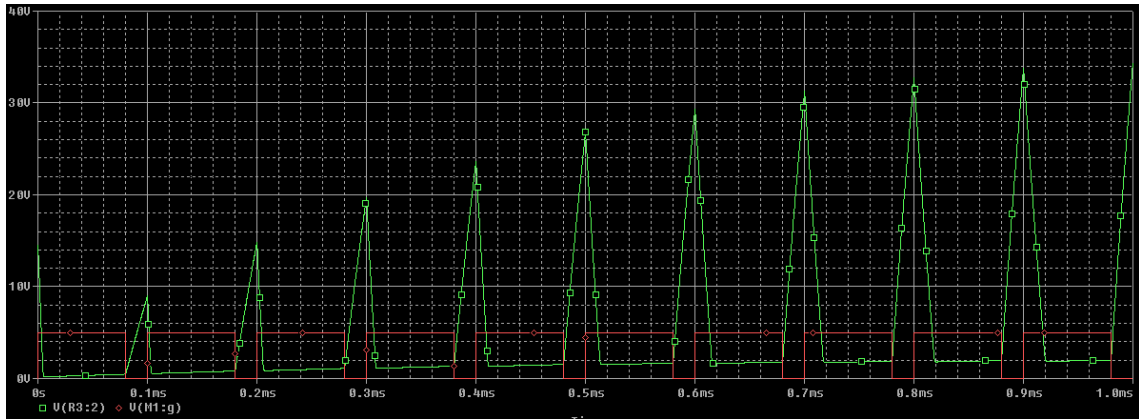
Este valor de 70 Volts es menor al pico provocado por el cambio rápido de la corriente. Al simular en PSPICE el circuito equivalente simplificado de la turbina con el controlador se observaron estos picos de voltaje.



En la gráfica es evidente que los picos pueden alcanzar valores de 80 V para un DutyCycle de 10%. Estos picos también se reportan en la literatura [1].

Para poder evitar estos picos de voltaje se colocó un capacitor en paralelo con el transistor para disminuir la variación en el voltaje y que el freno de vacío no se activara. La simulación muestra buenos resultados con un capacitor de 4.7 μ F.





Puede observarse que los picos de voltaje ahora se redujeron a valores menores de 40 Volts. No obstante, al probar esta solución en campo el sistema de control tampoco funcionó.

Comentarios

Como se mencionó en un principio, esta es solamente la primera etapa del sistema de control, por lo que el problema se simplificó utilizando resistencias en lugar de baterías. Las baterías, no obstante, evitarían el problema de los picos de voltaje ya que los absorberían. Por lo tanto, se recomienda pasar nuevamente al sistema de control con baterías en lugar de continuar dedicando tiempo a encontrar soluciones a los problemas del controlador simplificado para resistencias.

Referencias

[1] IEE, A peak power tracker for a small wind turbines in battery charging applications

Anexo

PROGRAMA DEL PIC.

```
__CONFIG _CP_OFF & _WDT_OFF & _PWRTE_ON & _XT_OSC

; *****
; * SE ASIGNAN LAS ETIQUETAS *
; *****
LIST P=16f873a
#include "p16f873a.inc"
TIMER EQU 0x01
T2CON EQU 0x12
CCPR1L EQU 0x15
CCP1CON EQU 0x17
CONTA EQU 0x20 ; Contador de desbordamientos del temporizador
CONTA2 EQU 0x21 ; Contador para el Delay
AMP EQU 0x22
X1 EQU 0x23 ; Variables para la multiplicacion.
X2 EQU 0x24 ; RES = X*Y, cada una tiene 16 bits.
Y1 EQU 0x25 ; La variable con el numero 1: Least significant Bits
Y2 EQU 0x26 ; La variable con el numero 2: Most significant Bits
RES1 EQU 0x27
RES2 EQU 0x28
R1 EQU 0x36
R2 EQU 0x37
ANS1 EQU 0x38
ANS2 EQU 0x39
RESIS1 EQU 0x29
RESIS2 EQU 0x2A
DUTY1 EQU 0x2B
DUTY2 EQU 0x2C
N1 EQU 0x2D
N2 EQU 0x2E
A1 EQU 0x2F
A2 EQU 0x30
B1 EQU 0x31
B2 EQU 0x32
C1 EQU 0x33
C2 EQU 0x34
TEMP EQU 0x35 ; Registro temporal para guardar variables
AMP1 EQU 36h
AMP2 EQU 37h
AMP3 EQU 38h
AMP4 EQU 39h
AMP5 EQU 3Ah
ANS3 EQU 3Bh
DUTY EQU 3Ch ;acomodar los msb en duty
DUTY_2 EQU 3Dh ;acomodar los dos lsb en duty,0 duty,1
FREC EQU 3Fh ;para que duty,1 > duty,0
PORC EQU 40h
ORG 0 ;origen del programa
goto inicio
ORG 4
goto inter
ORG 5

; *****CONFIGURACION DE LOS PUERTOS E INTERRUPCION *****

inicio bsf STATUS,RP0 ; Seleccionamos el Bank1
movlw b'00000011'
movwf TRISA ; Se configuran las entradas
movlw b'00000000'
movwf PORTB ; La puerta B se configura como salida
movlw b'00000000'
movwf PORTC ;La puerta C se configura como salida
movlw b'00000001'
movwf TIMER ;Se configuran las opciones de temporizador.
movlw b'00111111'
movwf T2CON ;PR2 determina una frecuencia en el PWM
bcf STATUS,RP0 ;Seleccionamos el Bank0
movlw b'10100000'
movwf INTCON ;Se configuran Interrupciones. GIE y T0IE
movlw 0x01
```



```

        movwf CONTA      ;Cantidad de veces que debe desbordarse TMRO
movlw 0xf0
        movwf TIMER      ;Se pone el valor inicial al temporizador
        bsf CCP1CON,2
        bsf CCP1CON,3    ;CCP1 se configura como PWM
        clrf DUTY1      ; se limpian todas las variable utilizadas
        clrf DUTY2
        clrf RESIS1
        clrf RESIS2
        clrf N1
        clrf N2
        clrf A1
        clrf A2
        clrf B1
        clrf B2
        clrf C1
        clrf C2
        clrf ANS1
        clrf ANS2
        clrf R1
        clrf R2
        clrf RES1
        clrf RES2
        clrf X1
        clrf X2
        clrf Y1
        clrf Y2
; * **RUTINA PRINCIPAL **

bucle goto bucle ;Se espera a que llegue la interrupción.

; *** DELAY ***

delay  movlw 0x05      ; retardo
        movwf CONTA2
d_loop decfsz CONTA2,1
        goto d_loop
        return

; ***PROCEDIMIENTO VARIOS ***
; 4 subrutinas para utilizarse en cualquier parte del programa
;1) "quita" es una subrutina que quita los ultimos 4 bits de un numero binario de 16
bits.
;2) "add16" es una subrutina que suma dos numeros de 16 bits, realizando la operacion
RES = RES + X
;3) "sub16" es una subrutina que resta dos numeros de 16 bits, realizando la operacion
RES = X - Y
;4) "multiplica" es una subrutina que multiplica dos numeros de 16 bits, realizando la
operacion RES = X * Y

; Subrutina 1. Recorre un numero de 16 bits, quitando los ultimos 4. Sirve para eliminar
valores fraccionales
quita
        movlw 0x04
        movwf CONTA2
        movlw 0x0
        btfsc X1,2
        movlw b'00010000'
        btfsc X1,3
        movlw b'00010000'
        addwf X1,1
        loop_q
        rrf X1,1
        bcf X1,7
        btfsc X2,0
        bsf X1,7
        rrf X2,1
        bcf X2,7
        decfsz CONTA2,1
        goto loop_q
return

; Subrutina 2. Realiza la suma de dos numeros de 16 bits: RES = RES + X

```

```

add16
    movf X1,0
    addwf RES1
    btfsc STATUS,0
    incf RES2
    movf X2,0
    addwf RES2
return

; Subrutina 3. Realiza la resta de dos numeros de 16 bits RES = X - Y
sub16
    movf Y1,0
    subwf X1,0
    movwf RES1
    btfss STATUS,C
    GOTO VER
    BCF STATUS,C
    GOTO NEXT
VER
    BCF STATUS,C
    movlw 1h
    subwf X2,1
    btfss STATUS,C
    goto negativo
NEXT
    movf Y2,0
    subwf X2,0
    movwf RES2
    goto salir_sub16
negativo
    clrf RES1
    clrf RES2
    bcf STATUS,C
    salir_sub16
return

; Subrutina 4. Realiza la multiplicacion de dos numeros de 16 bits RES = X * Y
multiplica
    clrf RES1
    clrf RES2
    m_loop
    btfsc Y1,0
    call add16
    bcf STATUS,0
    rrf Y2,1
    rrf Y1,1
    bcf STATUS,0
    rlf X1,1
    rlf X2,1
    movf Y1,1
    btfss STATUS,2
    goto m_loop
    movf Y2,1
    btfss STATUS,2
    goto m_loop
return

; ***Calculo de Duty Cycle ***
; Esta subrutina realiza el calculo de Duty Cycle para el PWM
; Requiere el valor medido de la corriente en Amperes, por lo que es
; necesario que se haya llamado antes a la subrutina "Amperaje"
; En el procedimiento el valor de la corriente (guardado en AMP)
; se usa para calcular la variable RESIS de 16 bits que establece
; le resistencia necesaria en terminales
; Posteriormente, RESIS se utiliza para calcular la variable DUTY que
; es el porcentaje de tempo en estado ON del PWM. Esto se calcula facilmente
; con la ecuacion: DUTY = 100 - 5*RESIS

DutyCycle

movlw 2h
subwf AMP,w
movwf AMP1
btfsc STATUS,Z ;Si son iguales Z=1
goto Const1
btfss STATUS,C ;Si byte_1>byte_ref entonces C=0

```



```

goto Const1

movlw 3h
subwf AMP1,w
movwf AMP2
btfsc STATUS,Z ;Si son iguales Z=1
goto Const2
btfss STATUS,C ;Si byte_1>byte_ref entonces C=0
goto Const2

movlw 5h
subwf AMP2,w
movwf AMP3
btfsc STATUS,Z ;Si son iguales Z=1
goto Const3
btfss STATUS,C ;Si byte_1>byte_ref entonces C=0
goto Const3

movlw 4h
subwf AMP3,w
movwf AMP4
btfsc STATUS,Z ;Si son iguales Z=1
goto Const4
btfss STATUS,C ;Si byte_1>byte_ref entonces C=0
goto Const4

movlw 6h
subwf AMP4,w
movwf AMP5
btfsc STATUS,Z ;Si son iguales Z=1
goto Const5
btfss STATUS,C ;Si byte_1>byte_ref entonces C=0
goto Const5
goto Const6

Const1
    movlw b'00110000'      ; El valor de la constante "A" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf A1
    movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Msb
    movwf A2

    movlw b'11101111'      ; El valor de la constante "B" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf B1
    movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "B" 8 MSb
    movwf B2

    movlw b'11100111'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf C1
    movlw b'00000001'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb
    movwf C2

    goto calcula

Const2
    movlw b'00000101'      ; El valor de la constante "A" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf A1
    movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Msb
    movwf A2

    movlw b'00111100'      ; El valor de la constante "B" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf B1
    movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "B" 8 MSb
    movwf B2

    movlw b'00101001'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf C1
    movlw b'00000001'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb
    movwf C2

    goto calcula

```

```

Const3
movlw b'00000001'      ; El valor de la constante "A" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf A1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Msb
movwf A2

movlw b'00010011'      ; El valor de la constante "B" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf B1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "B" 8 MSb
movwf B2

movlw b'11001001'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf C1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb
movwf C2

```

goto calcula

```

Const4
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf A1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Msb
movwf A2

movlw b'00001000'      ; El valor de la constante "B" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf B1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "B" 8 MSb
movwf B2

movlw b'10101000'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf C1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb
movwf C2

```

goto calcula

```

Const5
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf A1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Msb
movwf A2

movlw b'00000100'      ; El valor de la constante "B" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf B1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "B" 8 MSb
movwf B2

movlw b'01101011'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf C1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb
movwf C2

```

goto calcula

```

Const6
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf A1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "A" 8 Msb
movwf A2

movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "B" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
movwf B1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "B" 8 MSb
movwf B2

```

```

    movlw b'00100000'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb !!!!RECORDAR QUE LOS
ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf C1
    movlw b'00000000'      ; El valor de la constante "C" 8 Lsb
    movwf C2

    goto calcula

; ----- Se calcula la Resistencia optima -----
; ----- RESIS = A*AMP^2 - B*AMP + C -----

calcula
    movf AMP,0
    movwf X1
    clrf X2
    movf AMP,0
    movwf Y1
    clrf Y2
    call multiplica        ; Se multiplica I * I
    movf RES1,0
    movwf X1
    movf RES2,0
    movwf X2
    movf A1,0              ; El valor de la constante "A1" 8 Lsb !!!!RECORDAR
QUE LOS ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf Y1
    movf A2,0              ; El valor de la constante "A2" 8 Msb
    movwf Y2
    call multiplica        ; Se multiplica a * I^2
    movf RES1,0
    movwf RESIS1
    movf RES2,0
    movwf RESIS2        ; Se guarda el valor de a * I^2 en registro RESIS

    movf C1,0
    addwf RESIS1
    btfsc STATUS,0
    incf RESIS2
    movf C2,0
    addwf RESIS2        ; Se guarda el valor de (a * I^2) + c en registro RESIS

    movf AMP,0
    movwf X1
    clrf X2
    movf B1,0              ; El valor de la constante "b" 8 Lsb !!!!RECORDAR
QUE LOS ULTIMOS CUATRO BITS SON A LA DERECHA DEL PUNTO DECIMAL!!!!
    movwf Y1
    movf B2,0              ; El valor de la constante "b" 8 MSb
    movwf Y2
    call multiplica        ; Se multiplica b * I
    movf RES1,0
    movwf Y1
    movf RES2,0
    movwf Y2        ; Se guarda el valor de (a * I^2) + c - (b * I) en el registro
RESIS

    movf RESIS1,0
    movwf X1
    movf RESIS2,0
    movwf X2
    call sub16
    movf RES1,0
    movwf RESIS1
    movf RES2,0
    movwf RESIS2

    movf RESIS1,0
    movwf X1
    movf RESIS2,0
    movwf X2
    call quita
    movf X1,0
    movwf RESIS1
    movf X2,0
    movwf RESIS2

; ----- Se calcula el valor del Duty Cycle -----
; ----- DUTY = K2 - K1*RESIS -----

```

```

movlw b'00000101'      ; El valor de la constante K1 8 LSB
movwf Y1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante K1 8 MSb
movwf Y2
movf RESIS1,0
movwf X1
movwf ANS3
movf RESIS2,0
movwf X2
call multiplica          ; Se multiplica K1 * R

movlw b'01100100'      ; El valor de la constante K2 8 LSB
movwf X1
movlw b'00000000'      ; El valor de la constante K2 8 MSb
movwf X2
movf RES1,0
movwf Y1
movf RES2,0
movwf Y2
call sub16              ; Se resta K2 - K1 * R

movf RES1,0
movwf DUTY1
movf RES2,0
movwf DUTY2

; ****CALCULO DEL PWM ***

IDENTIFICA              ;subrutina para 10 Khz en donde CCPR1L,CCP1CON<5,4>
;coincide con el porcentaje dado

movf DUTY1,W
;movlw 0x4b
movwf porc
bsf STATUS,RP0
movlw 0x18              ;para una frecuencia de 10Khz
movwf frec
bcf STATUS,RP0
btfss porc,0
goto OF1
goto ON1
OF1 bcf duty_2,0
goto BS
ON1 bsf duty_2,0
BS btfss porc,1
goto OF2
goto ON2
OF2 bcf duty_2,1
goto BS1
ON2 bsf duty_2,1
BS1 rrf porc,1          ;1 para almacenarlo en el propio registro
rrf porc,1
movlw b'00111111'
andwf porc,1          ;1 para almacenarlo en el propio registro
movf porc,W
movwf duty

PWM_DC
;clrf duty
;clrf duty2

bsf STATUS,RP0
;movlw 0x18
movf frec,W
movwf PR2
bcf STATUS,RP0

;bsf duty2,0
;bcf duty2,1
;movlw 0x79
;movwf duty

```

```

        btfss duty_2,0          ;prueba duty,0 si es 1, haz CCP1CON,4=1
        goto OF3
        goto ON3
OF3     bcf CCP1CON,4
        goto BX1
ON3     bsf CCP1CON,4
BX1     btfss duty_2,1          ;prueba duty,1 si es uno, haz CCP1CON,5=1
        bcf CCP1CON,5
        goto BX2
        bsf CCP1CON,5
        ;bsf CCP1CON,4          ;haz CCP1CON,4=0 - lsb de dutyC
        ;bsf CCP1CON,5          ;has CCP1CON,5=1 - lsb de dutyC
BX2     movf duty,W              ;lleva los 8 bits de mayor peso a W
        movwf CCP1L             ;lleva W con los 8 bits a CCP1L

        bsf STATUS,RP0
        bcf TRISC,2
        bcf STATUS,RP0

        bsf T2CON,0             ;prescaler 4
        bcf T2CON,1             ;prescaler 4
        bsf T2CON,2             ;activar prescaler

        bsf CCP1CON,3
        bsf CCP1CON,2           ;modulo activado con CCP1CON<3,2>=1

```

RETURN

; ****CALCULO DE AMPERAJE ***

```

;
; Este procedimiento cambia el valor medido por el ADC al valor real de la
; corriente en Amperes
;
; Para ello se resta 0.615 V y se divide entre 40 mV. Esto es el equivalente a
; restar 123 y dividir entre 8, tomando en cuenta la resolucio del ADC
; en el cual incrementar el valor de ANS en una unidad equivale a 5 mV.
;
;

```

Amperaje

```

; ----- Se restan 123 a ANS -----
; ----- R = ANS - 123 -----
        movlw 07Bh              ; Se pone 123 en W
        movwf Y1                 ; Se asigna 123 en Y1 (LSb de Y)
        clrf Y2                  ; Se asigna 0 en Y2 (MSb de Y)
        movf ANS1,0              ; Se asigna ANS1 a X1 (LSb de ANS a LSb de X)
        movwf X1
        movf ANS2,0              ; Se asigna ANS2 a X2 (MSb de ANS a MSb de X)
        movwf X2
        call sub16               ; Se llama a subrutina sub16 que devuelve RES = X - Y
        movf RES1,0              ; Se asigna RES1 a R1 (LSb de RES a LSb de R)
        movwf R1
        movf RES2,0              ; Se asigna RES2 a R2 (MSb de RES a MSb de R)
        movwf R2
        btfsc STATUS,C           ; Se verifica si hubo acarreo en la resta
        goto div                 ; Si NO HUBO ACARREO entonces vamos a la division
        clrf R1                  ; Si SI HUBO ACARREO entonces dejamos a R en cero
        clrf R2

; ----- Se divide entre 8 -----
; ----- R = R / 8 -----
div ; Haya o no haya acarreo dividimos entre 8 rotando 3 veces el numero a la derecha
        movlw b'00000100'        ; Sumamos 8 al valor de R1 para redondear
        addwf R1,1                ;
        rrf R1,1                  ; Primera rotacion
        bcf R1,7                  ; Borramos el bit 7
        rrf R1,1                  ; Segunda rotacion
        bcf R1,7                  ; Borramos el bit 7
        rrf R1,1                  ; Tercera rotacion
        bcf R1,7                  ; Borramos el bit 7
        btfsc R2,0                ; Se asignan los ultimos tres bits de R2 a los primeros 3
bits de R1
        bsf R1,5                  ;
        btfsc R2,1                ;
        bsf R1,6                  ;

```

```

    btfsc R2,2          ;
    bsf R1,7           ;
    rrf R2,1           ; Primera rotacion de R2
    bcf R2,7           ; Borramos el bit 7
    rrf R2,1           ; Segunda rotacion de R2
    bcf R2,7           ; Borramos el bit 7
    rrf R2,1           ; Tercera rotacion de R2
    bcf R2,7           ; Borramos el bit 7
    movf R1,0          ; Asignamos el valor de R1 a AMP. !!! R2 SIEMPRE DEBE SER
CERO
    movwf AMP
return

; ***CONVERSION ANALOGO - DIGITAL ***
; Este procedimiento realiza la conversion Analogo - Digital

adcon
    movlw 0x01
    movwf CONTA          ; Se reinicia el contador
    bsf STATUS,RP0      ; Cambiamos al Bank 1
    movlw b'10000101'
    movwf ADCON0        ; Ponemos ADCON0 en 00000101 que significa que bits [1,0]
del puerto A son analogos y el resto digitales
    bcf STATUS,RP0      ; Cambiamos al Bank 0
; Conversion AD en pin RA1
    movlw b'11001001'
    movwf ADCON0        ; Ponemos ADCON0 en 11001001 que implica usar el reloj
interno, RA1 como puerto de entrada y se prende el A/D
    call delay          ; Breve delay antes de comenzar conversion para
permitir carga del capacitor
    bsf ADCON0,2        ; Se inicia la conversion A/D
    call delay          ; Breve delay despues de conversion
    movf ADRESH,0      ; Los MSb se de la conversion se escribe en W
    movwf ANS2         ; Los MSb se guardan en el registro ANS2
    bsf STATUS,RP0     ; Bank1
    movf ADRESL,W      ; Los LSB de la conversion se escriben en W
    bcf STATUS,RP0     ; Bank 0
    movwf ANS1         ; Los LSB de la conversion se guardan en ANS1
    call Amperaje
    call DutyCycle     ; Una vez guardados los valores en ANS1 y ANS2
return                ; Termina subrutina de conversion AD y se va a la salida

; ***RUTINA DE SERVICIO ***
; Se activa cuando hay una interrupcion. SOLO ESTAN ACTIVADAS INTERRUPCIONES POR EL
TEMPORIZADOR

inter
    bcf INTCON,7       ; Se bloquean las interrupciones
    decfsz CONTA,1     ; Se resta uno a CONTA y se prueba si es cero
    goto salir         ; Si no es cero ir a "salir"
    call adcon         ; Si es cero ir a "adcon", para realizar la conversion AD

salir
    movlw 0xfc
    movwf TIMER        ; Se reinicia el contador
    movlw b'10100000'
    movwf INTCON       ; Se borran las banderas de interrupciones y se activan las
interrupciones deseadas

retfie                ; Salimos de la rutina de servicio

END                ; Fin del programa

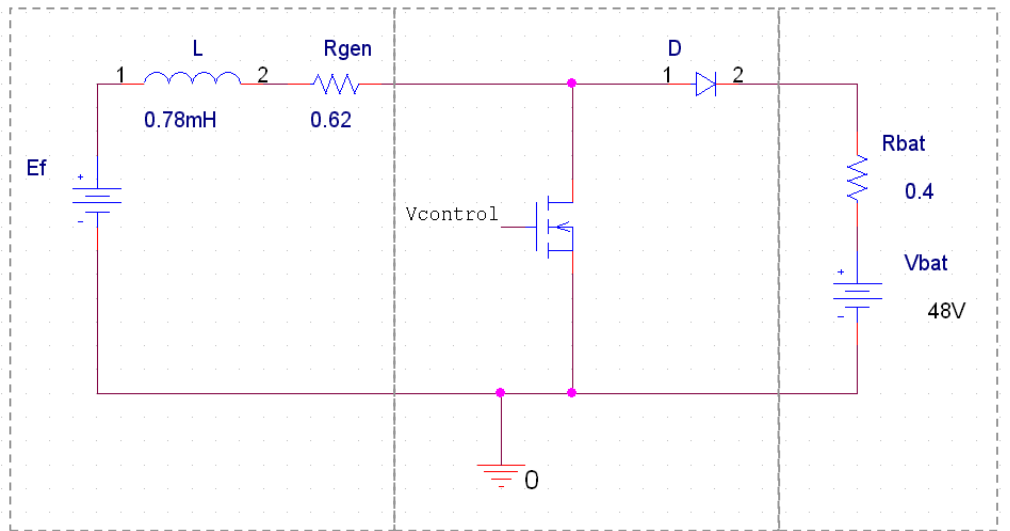
```

Simulación dinámica

Se creó un modelo matemático para simular dinámicamente a la turbina Aeroluz Pro, tanto en su parte mecánica como eléctrica.

Modelo matemático

La turbina se modeló en forma simplificada acorde al siguiente circuito:



Modelo generador

Modelo controlador

Modelo baterías

Modelo del generador

El voltaje inducido en el generador eléctrico no es constante, sino que depende de la velocidad rotacional según la siguiente ecuación:

$$E_f = K_E \cdot n_s$$

Donde:

K_E :	Constante de voltaje específica del generador	[V/rpm]
n_s :	Velocidad rotacional de la turbina.	[rpm]

La velocidad rotacional n_s no es constante, y su derivada depende de la diferencia entre el torque aerodinámico que producen las aspas y el torque mecánico que requiere el generador. Por ello, podemos escribir:

$$\frac{dn_s}{dt} = \frac{T_{aero} - T_{mec}}{K_I}$$

Donde:

T_{aero} :	Torque provocado por las aspas sobre el generador	[Nm]
T_{mec} :	Torque requerido por el generador	[Nm]
K_I :	Constante de inercia del rotor	[Nms/rpm]

- *Calculo de torque aerodinámico*

El torque producido por las aspas se puede escribir como:

$$T_{aero} = K_A \cdot C_Q \cdot U_\infty^2$$

Donde:

K_A :	Constante aerodinámica específica de las aspas	[Nm/(m/s) ²]
C_Q :	Coefficiente de torque específico de las aspas	[-]
U_∞ :	Velocidad del viento libre	[m/s]

El coeficiente de torque depende de la geometría del perfil aerodinámico, la cuerda, el ángulo de paso, etc. pero puede hacerse una aproximación polinomial de la siguiente forma:

$$C_Q = A\lambda^6 + B\lambda^5 + C\lambda^4 + D\lambda^3 + E\lambda^2 + F\lambda + G$$

Con λ definida como:

$$\lambda = \frac{K_\lambda \cdot n_s}{U_\infty}$$

Donde:

K_λ :	Constante de velocidad rotacional	[(m/s)/rpm]
A-G	Coefficientes constantes específicos de las aspas.	

- *Cálculo de torque mecánico*

El torque requerido por el generador es proporcional a la corriente producida, por lo que podemos escribir:

$$T_{mec} = K_i \cdot I_{cd} + T_0$$

Donde

K_i :	Constante de corriente específica del generador	[Nm/A]
I_{cd} :	Corriente eléctrica que sale del generador en CD	[A]
T_0 :	Torque en vacío	[Nm]

Puede verse que la ecuación diferencial para la velocidad rotacional es no lineal, ya que el torque aerodinámico depende de n_s y del tiempo (a través de cambios en la velocidad de viento), y el torque mecánico depende de I_{cd} que a su vez depende del tiempo como se verá más adelante.

Por ello, para resolver se utiliza el programa computacional MATLAB (ver más abajo).

Modelo del MOSFET

El MOSFET del controlador se modeló en sus tres estados:

1) *En corte*

Cuando el voltaje de control es menor a V_{inf} , el MOSFET se comporta como un circuito abierto, evitando el paso de la corriente.

2) *En saturación*

Cuando el voltaje de control es mayor a V_{sup} , el MOSFET se comporta como una resistencia constante con valor R_{on} .

3) *En amplificación*

Cuando el voltaje de control es entre V_{inf} y V_{sup} , el MOSFET se comporta como una resistencia variable que cambia linealmente entre R_t (cuando el voltaje es V_{inf}) y R_{on} (cuando el voltaje es V_{sup})

Este modelo del MOSFET ignora la dependencia con corriente, la temperatura, etc.

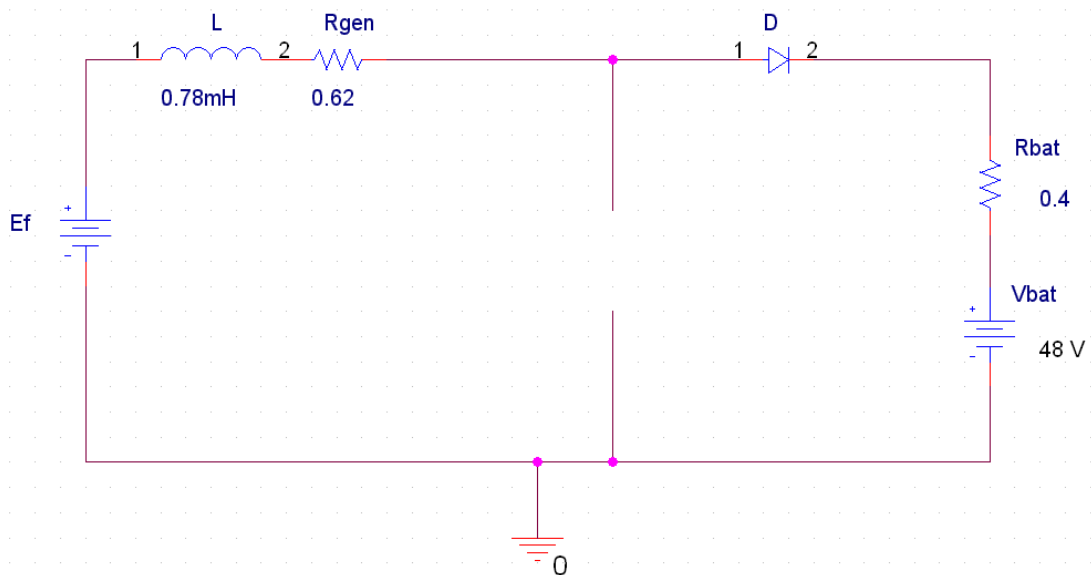
Con lo anterior, la resistencia del MOSFET en función del voltaje de control para el estado de amplificación lo escribimos como:

$$R_{mos} = R_t - \left(\frac{R_t - R_{on}}{V_{sup} - V_{inf}} \right) (V_{con} - V_{inf})$$

Cálculos del circuito

Debido al modelo del MOSFET, existen dos estados que se analizan por separado:

1) Cuando el voltaje de control es menor a V_{inf} (MOSFET en corte):



En este caso, la corriente que sale del generador I_{cd} es igual a la corriente que llega a baterías.

Aplicando la ley de suma de voltajes de Kirchhoff, tenemos la siguiente ecuación:

$$L \frac{dI_{cd}}{dt} + R_{gen} \cdot I_{cd} + V_d + R_{bat} \cdot I_{cd} + V_{bat} - E_f = 0$$

Reacomodando los términos, encontramos que:

$$\frac{dI_{cd}}{dt} + \left(\frac{R_{gen} + R_{bat}}{L} \right) \cdot I_{cd} = \left(\frac{E_f - V_{bat} - V_d}{L} \right)$$

Como los términos entre paréntesis son constantes, podemos escribir:

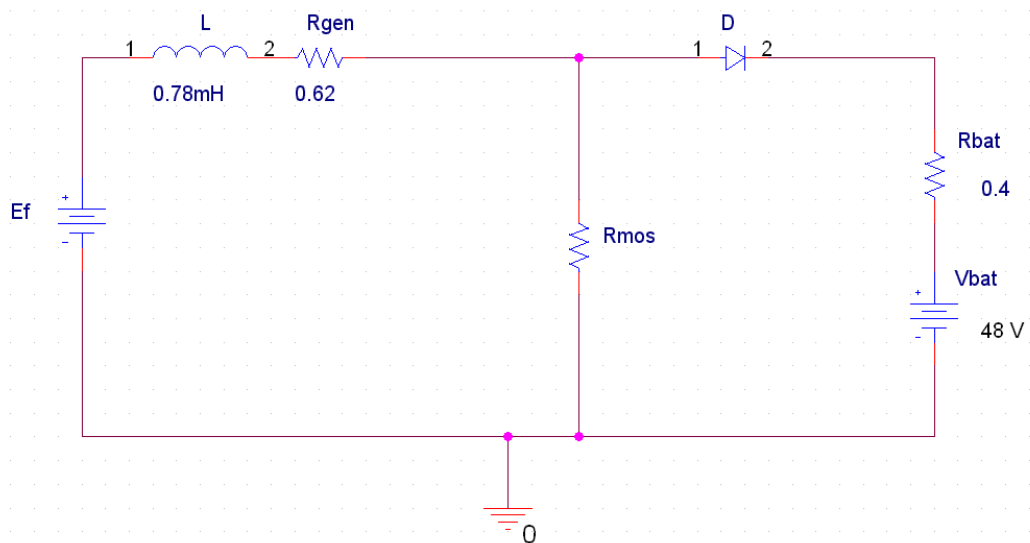
$$\frac{dI_{cd}}{dt} + K_1 \cdot I_{cd} = K_2$$

Con:

$$K_1 = \left(\frac{R_{gen} + R_{bat}}{L} \right)$$

$$K_2 = \left(\frac{E_f - V_{bat} - V_d}{L} \right)$$

- 2) Cuando el voltaje de control es mayor a V_{inf} (MOSFET en saturación o amplificación) tenemos el circuito:



En este caso, la ley de suma de voltajes de Kirchhoff arroja dos ecuaciones:

$$L \frac{dI_{cd}}{dt} + R_{gen} \cdot I_{cd} + R_{mos} \cdot (I_{cd} - I_{bat}) - E_f = 0$$

$$R_{mos} \cdot (I_{bat} - I_{cd}) + V_d + R_{bat} \cdot I_{bat} + V_{bat} = 0$$

Donde la corriente I_{bat} es la corriente en la segunda malla. Cabe señalar que si $R_{mos} \cdot (I_{cd} - I_{bat}) < I_{bat} \cdot R_{bat} + V_{bat}$ entonces las ecuaciones anteriores no aplican ya que el diodo estaría conduciendo en sentido contrario ($I_{bat} < 0$). En ese caso, corriente I_{bat} es cero.

a) Para el caso en que I_{bat} es mayor a cero, de la segunda ecuación podemos despejar:

$$I_{bat} = \frac{R_{mos} \cdot I_{cd} - V_d - V_{bat}}{R_{mos} + R_{bat}}$$

Sustituyendo esto en la primera ecuación y reacomodando términos, encontramos que:

$$\frac{dI_{cd}}{dt} + \left(\frac{1}{L}\right) \left(\frac{(R_{mos} + R_{gen})^2 - R_{mos}^2}{R_{mos} + R_{bat}} \right) \cdot I_{cd} = \left(\frac{1}{L}\right) \left(E_f - \frac{R_{mos} \cdot (V_d + V_{bat})}{R_{mos} + R_{bat}} \right)$$

Nuevamente como los términos entre paréntesis son constantes, podemos escribir:

$$\frac{dI_{cd}}{dt} + K_1 \cdot I_{cd} = K_2$$

Con:

$$K_1 = \left(\frac{1}{L}\right) \left(\frac{(R_{mos} + R_{gen})^2 - R_{mos}^2}{R_{mos} + R_{bat}} \right)$$

$$K_2 = \left(\frac{1}{L}\right) \left(E_f - \frac{R_{mos} \cdot (V_d + V_{bat})}{R_{mos} + R_{bat}} \right)$$

b) Para el caso en que I_{bat} es menor a cero, i.e. el diodo está polarizado inversamente, solamente se tiene la primera ecuación con $I_{bat} = 0$ encontrando que:

$$\frac{dI_{cd}}{dt} + \left(\frac{R_{gen} + R_{mos}}{L} \right) \cdot I_{cd} = \left(\frac{E_f}{L} \right)$$

O bien,

$$\frac{dI_{cd}}{dt} + K_1 \cdot I_{cd} = K_2$$

Con:

$$K_1 = \left(\frac{R_{gen} + R_{mos}}{L} \right)$$

$$K_2 = \left(\frac{E_f}{L} \right)$$

Puede verse que en todos los casos, se tiene la misma ecuación diferencial, solamente con constantes diferentes. La solución en términos de las constantes K_1 y K_2 es:

$$I_{cd} = \frac{K_2}{K_1} + C \cdot \exp(-K_1 \cdot t)$$

La constante C se puede expresar en términos de la corriente I_0 en el tiempo $t = 0$:

$$I_{cd} = \frac{K_2}{K_1} + \left(I_0 - \frac{K_2}{K_1} \right) \cdot \exp(-K_1 \cdot t)$$

Programación en MATLAB

Las ecuaciones anteriores se escribieron en MATLAB. El código se divide en dos archivos:

- modelo.m

En este archivo se define el periodo de simulación, las variables de velocidad de viento y voltaje de control durante este período, y se llama a una función ODE que resuelve la ecuación diferencial de la velocidad rotacional.

La función ode45 que aplica el método Runge-Kutta de orden 4, arroja buenos resultados, pero para problemas en donde el voltaje de control varía muy rápido (al colocar un PWM por ejemplo) es conveniente cambiar al ode15s, ode23s o incluso ode23t.

- Vel_Rot.m

En este archivo se escriben las ecuaciones del modelo para solucionar la ecuación diferencial de la velocidad rotacional.

Valores para la turbina Aeroluz Pro

En el caso específico de la turbina Aeroluz Pro, se tienen los siguientes valores para el modelo:

- Modelo del generador

L	0.78×10^{-3} H	A	2.170212×10^{-6}
R _{gen}	0.62 Ω	B	-1.007046×10^{-4}
V _{bat}	48 V	C	1.806706×10^{-3}
R _{bat}	0.2 Ω	D	-1.541942×10^{-2}
V _d	0.7 V	E	5.992004×10^{-2}
		F	-7.363468×10^{-2}
		G	3.463268×10^{-2}
K _E	0.1950 V/rpm		
K _I	0.4400 Nms/rpm		
K _i	1.8544 Nm/A		
K _A	11.7300 Nm/(m/s) ²		
K _λ	0.1520 (m/s)/rpm		
T ₀	1.4200 Nm		

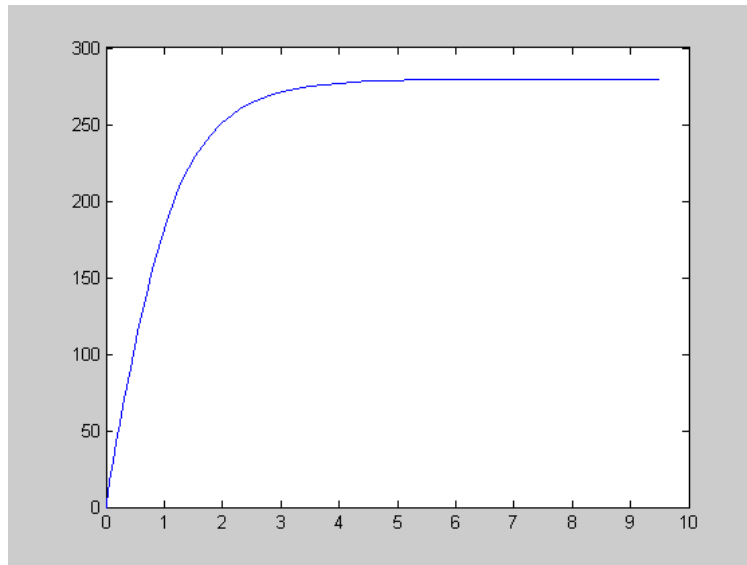
Modelo del MOSFET

V _{inf}	4.5 V
V _{sup}	5.5 V
R _{on}	4×10^{-3} Ω
R _t	20×10^{-3} Ω

Comparación con modelo de estado estable

Para validar el modelo dinámico se simuló la turbina con un viento de 5 m/s constante, y un voltaje de control de 0 Volts, i.e. el MOSFET está en corte y la turbina se conecta directo a baterías. El estado inicial de la turbina es con velocidad rotacional de cero.

La simulación arroja lo siguiente:

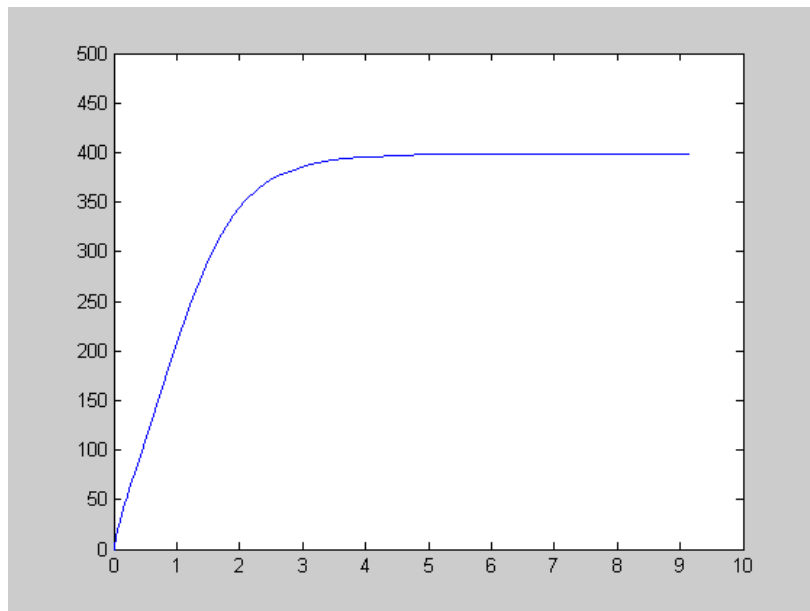


Nota: En todas las gráficas el eje-x es el tiempo y el eje-y la velocidad rotacional

Se observa que la velocidad rotacional tiende a un valor constante de aproximadamente 270 rpm. Esto es muy similar al que se obtiene con el modelo completo de la turbina en estado estable que predice 260 rpm:

U _{viento} (m/s)	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
n_s (RPM)											
50	9.2	9.4	9.7	9.4	9.4	9.2	9.0	8.9	8.7	8.6	8.4
60	10.8	10.6	10.8	11.0	11.0	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.2
70	12.7	12.2	12.1	12.3	12.5	12.5	12.4	12.3	12.2	12.1	12.0
80	14.8	14.0	13.5	13.4	13.7	13.9	14.0	13.9	13.8	13.7	13.6
90	17.2	15.9	15.2	14.9	14.7	15.0	15.2	15.4	15.4	15.2	15.1
100	19.6	18.2	17.1	16.4	16.0	15.9	16.2	16.5	16.7	16.7	16.6
110	22.1	20.5	19.1	18.1	17.5	17.2	17.1	17.3	17.7	17.9	18.0
120	24.7	22.9	21.4	20.0	19.2	18.6	18.2	18.1	18.4	18.8	19.1
130	27.4	25.3	23.7	22.2	20.9	20.1	19.6	19.2	19.1	19.4	19.8
140	30.5	27.7	26.0	24.4	22.9	21.8	21.0	20.5	20.1	20.0	20.3
150	34.1	30.3	28.3	26.7	25.1	23.7	22.6	21.9	21.3	20.9	20.9
160	0.0	32.9	30.7	29.0	27.4	25.7	24.3	23.3	22.6	22.1	21.7
170	0.0	35.6	33.2	31.3	29.7	27.9	26.3	24.9	24.0	23.3	22.7
180	0.0	38.6	35.7	33.7	31.9	30.2	28.4	26.8	25.4	24.5	23.8
190	0.0	41.8	38.3	36.1	34.2	32.5	30.6	28.8	27.1	25.9	25.0
200	0.0	46.0	40.9	38.5	36.6	34.7	32.8	30.9	29.0	27.4	26.3
210	0.0	0.0	43.6	41.0	38.9	37.0	35.1	33.1	31.1	29.2	27.7
220	0.0	0.0	46.5	43.5	41.3	39.3	37.3	35.3	33.3	31.2	29.2
230	0.0	0.0	49.5	46.0	43.7	41.6	39.6	37.6	35.5	33.3	31.1
240	0.0	0.0	52.7	48.6	46.1	44.0	41.9	39.8	37.7	35.4	33.1
250	0.0	0.0	56.7	51.3	48.6	46.3	44.2	42.1	39.9	37.6	35.3
260	0.0	0.0	0.0	54.0	51.1	48.7	46.5	44.4	42.1	39.8	37.4
270	0.0	0.0	0.0	56.8	53.6	51.1	48.9	46.6	44.4	42.0	39.6
280	0.0	0.0	0.0	59.9	56.1	53.5	51.2	49.0	46.6	44.3	41.8
290	0.0	0.0	0.0	63.0	58.7	56.0	53.6	51.3	48.9	46.5	44.0

Al simular con un viento de 9 m/s el resultado también es similar entre ambos modelos, obteniendo aproximadamente 400 rpm con el modelo dinámico:



Mientras que el modelo de estado estable predice una velocidad rotacional de 370 rpm:

U _{viento} (m/s)	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
n _s (RPM)	V _{Bat} (V)															
210	0.0	0.0	43.6	41.0	38.9	37.0	35.1	33.1	31.1	29.2	27.7	26.5	25.6	24.7	24.1	23.7
220	0.0	0.0	46.5	43.5	41.3	39.3	37.3	35.3	33.3	31.2	29.2	27.7	26.6	25.6	24.8	24.1
230	0.0	0.0	49.5	46.0	43.7	41.6	39.6	37.6	35.5	33.3	31.1	29.2	27.7	26.5	25.5	24.6
240	0.0	0.0	52.7	48.6	46.1	44.0	41.9	39.8	37.7	35.4	33.1	30.9	28.9	27.5	26.3	25.2
250	0.0	0.0	56.7	51.3	48.6	46.3	44.2	42.1	39.9	37.6	35.3	32.8	30.5	28.6	27.1	25.8
260	0.0	0.0	0.0	54.0	51.1	48.7	46.5	44.4	42.1	39.8	37.4	34.9	32.2	29.9	28.0	26.4
270	0.0	0.0	0.0	56.8	53.6	51.1	48.9	46.6	44.4	42.0	39.6	37.0	34.2	31.6	29.1	27.2
280	0.0	0.0	0.0	59.9	56.1	53.5	51.2	49.0	46.6	44.3	41.8	39.1	36.3	33.4	30.6	28.1
290	0.0	0.0	0.0	63.0	58.7	56.0	53.6	51.3	48.9	46.5	44.0	41.3	38.5	35.4	32.2	29.3
300	0.0	0.0	0.0	66.8	61.4	58.4	55.9	53.6	51.3	48.8	46.2	43.5	40.6	37.5	34.2	30.8
310	0.0	0.0	0.0	71.5	64.0	60.9	58.3	55.9	53.5	51.1	48.5	45.8	42.8	39.6	36.2	32.6
320	0.0	0.0	0.0	0.0	66.9	63.4	60.7	58.3	55.8	53.4	50.7	48.0	45.0	41.8	38.3	34.6
330	0.0	0.0	0.0	0.0	69.7	65.9	63.1	60.6	58.2	55.7	53.0	50.3	47.3	44.1	40.5	36.6
340	0.0	0.0	0.0	0.0	72.8	68.4	65.5	63.0	60.5	58.0	55.3	52.5	49.5	46.3	42.7	38.8
350	0.0	0.0	0.0	0.0	76.1	71.1	68.0	65.3	62.8	60.3	57.6	54.8	51.8	48.5	44.9	40.9
360	0.0	0.0	0.0	0.0	79.7	73.7	70.4	67.7	65.1	62.6	59.9	57.1	54.1	50.8	47.2	43.2
370	0.0	0.0	0.0	0.0	85.0	76.5	72.9	70.1	67.5	64.9	62.3	59.5	56.4	53.1	49.5	45.5
380	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.4	75.5	72.5	69.9	67.3	64.6	61.8	58.8	55.5	51.9	47.9
390	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.5	78.1	75.0	72.3	69.6	67.0	64.1	61.1	57.9	54.2	50.3
400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	85.9	80.8	77.5	74.7	72.0	69.3	66.5	63.5	60.2	56.6	52.7
410	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.8	83.6	80.0	77.1	74.4	71.7	68.9	65.9	62.6	59.1	55.1
420	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94.8	86.4	82.6	79.5	76.8	74.0	71.2	68.2	65.0	61.5	57.5
430	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	106.0	89.4	85.2	82.0	79.2	76.4	73.6	70.6	67.4	63.9	60.0

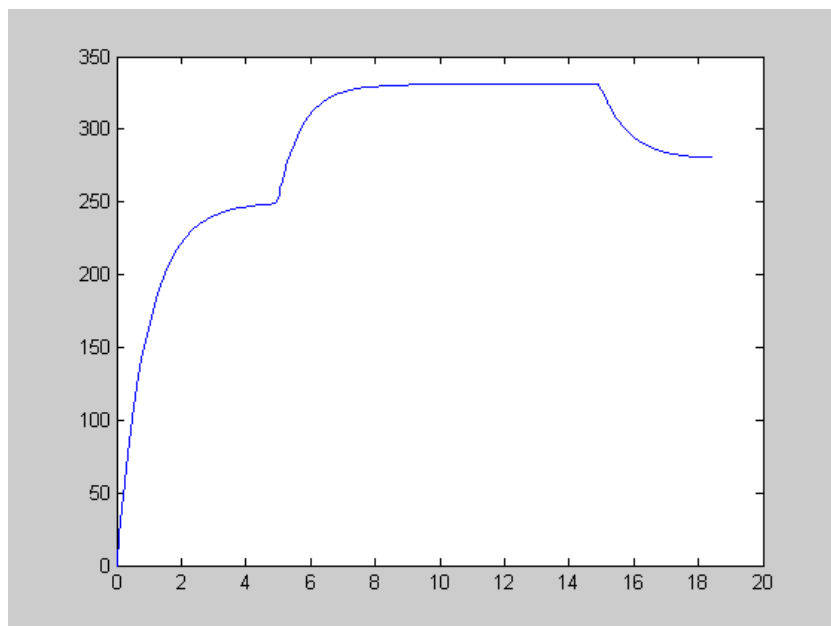
Simulación dinámica

El modelo puede simular variaciones en el viento y el voltaje de control. A continuación se estudian varios casos.

Caso 1. Variación en el viento

- El tiempo de simulación es de 20 segundos.
- El viento comienza en 3 m/s, pero a los 5 segundos aumenta repentinamente a 7 m/s, y a los 15 segundos baja a 5 m/s.
- El voltaje de control se mantiene siempre en 0 Volts, i.e. la turbina siempre esta conectada a baterías.

La simulación arroja lo siguiente:

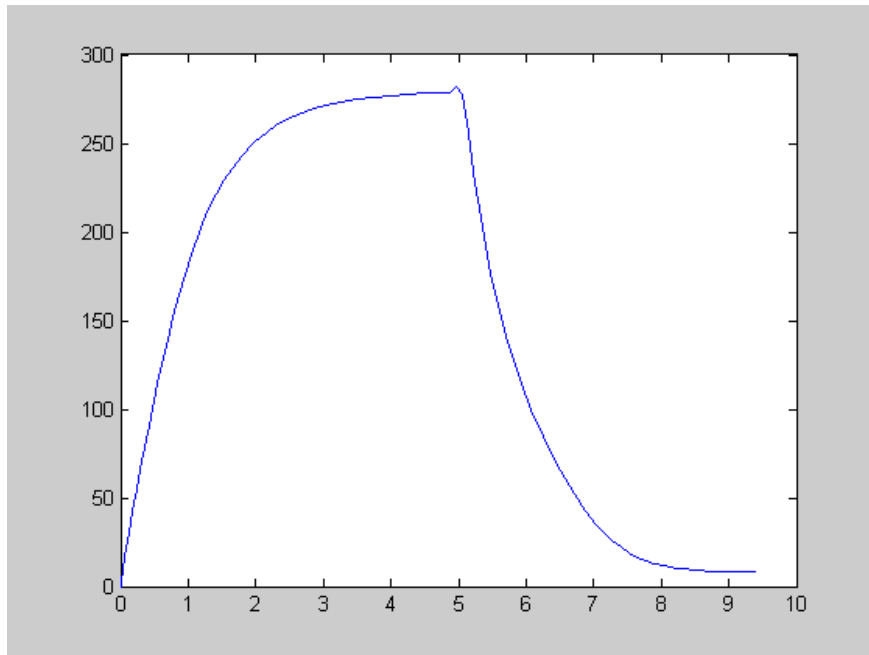


Claramente se observa que la turbina arranca y tiende al valor estable de un viento de 3 m/s, pero a los 5 segundos comienza a acelerarse nuevamente para buscar el estado estable de 7 m/s. Posteriormente cuando el viento disminuye a 5 m/s (a los 15 seg) se observa una disminución en la velocidad rotacional.

Caso 2. Variación en el voltaje de control. Turbina se frena.

- El tiempo de simulación es de 10 segundos
- El viento se mantiene constante en 5 m/s
- El voltaje de control comienza en 0 Volts y se aumenta a 10 Volts a los 5 segundos.

La simulación arroja lo siguiente:



Es evidente que la turbina arranca conectada directamente a baterías y al aumentar el voltaje de control, se activa el MOSFET y la turbina se pone en corto circuito. Esto la frena y disminuye drásticamente la velocidad rotacional. El tiempo de frenado es de aproximadamente 3 segundos, muy parecido a lo observado en las pruebas de campo.

Simulación de control por PWM (Pulse Width Modulation)

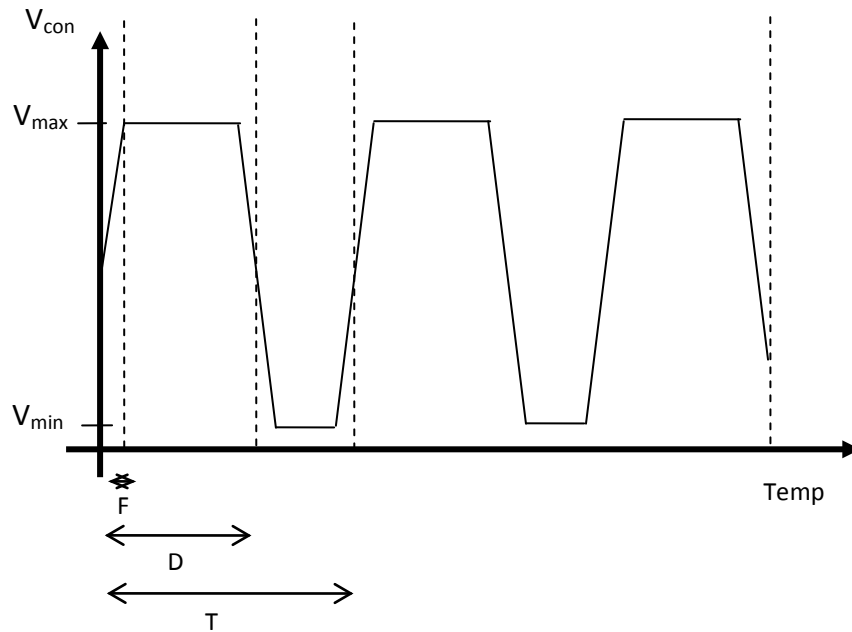
El modelo dinámico es capaz de simular un voltaje de control que aplique una señal PWM de alta frecuencia. No obstante en este caso el problema se convierte en uno “rígido” caracterizado por tener constantes de tiempo a la vez largas (en los cambios de velocidad rotacional) y cortas (en el PWM). Los problemas rígidos suelen arrojar resultados numéricamente poco estables y tiempos de simulación largos. Por ello, se recomienda:

- Utilizar frecuencias de PWM menores a 1 kHz, y tiempo de pendiente de al menos 5%
- Para casos en que la inestabilidad numérica es evidente, cambiar la función de ode45 a ode15s, aunque no siempre hay mejores resultados.
- Para casos en que la simulación diverge, hay que cambiar alguno de los parámetros como el tiempo de simulación, la pendiente en el PWM o la frecuencia de muestreo para la simulación.

Creación de señal PWM

Para crear la función PWM, se implementó una función en MATLAB que arroja los valores del control acorde a 7 parámetros:

- T: El periodo del PWM en segundos
- D: El “Duty Cycle” del PWM en fracción de T
- F: La mitad de la fracción de tiempo de pendiente del voltaje
- V_{max} : El voltaje alto del PWM
- V_{min} : El voltaje bajo
- Temp: Tiempo que dura el PWM
- dt: El tamaño de paso

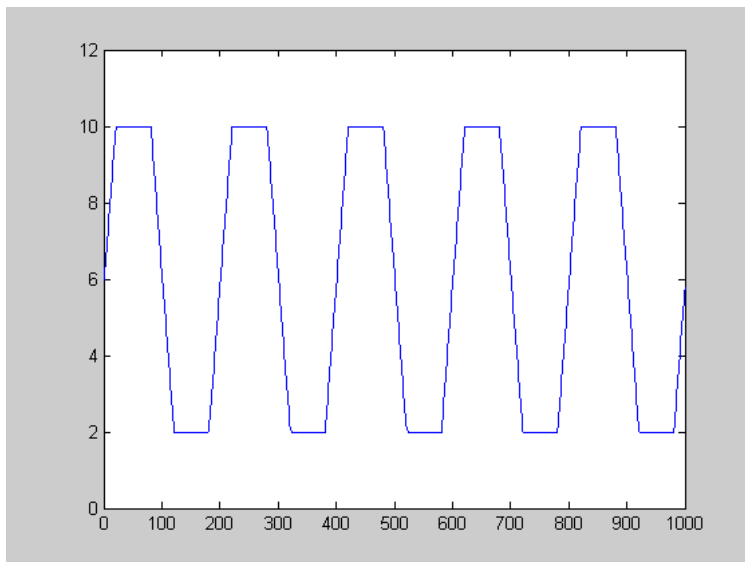


La función se llama con la instrucción: $V_{con} = \text{PWM}(T, D, F, V_{max}, V_{min}, \text{Temp}, dt)$

Por ejemplo, al escribir en MATLAB:

```
Vcon = PWM(2, 0.5, 0.1, 10, 2, 10, 0.01)
```

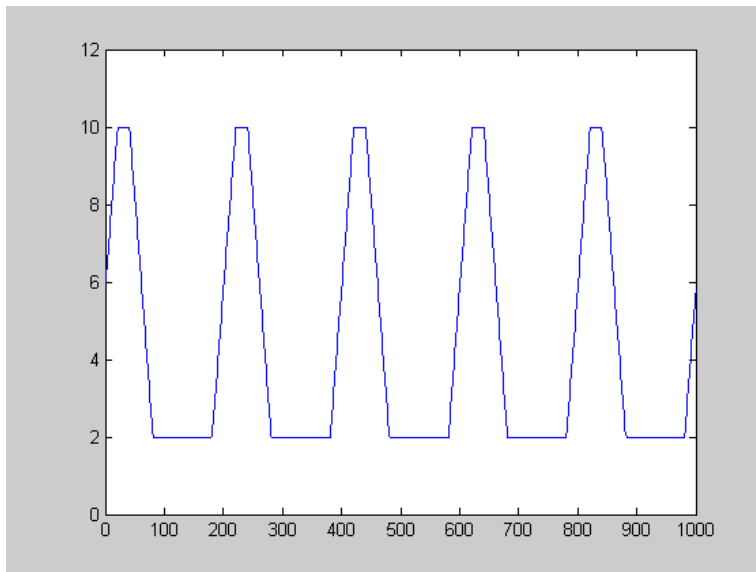
Creamos un PWM con periodo de 2 segundos, 50% de Duty Cycle, 10% de tiempo de pendiente, que oscila entre 2 y 10 Volts, que dura 10 segundos y que tiene 1000 puntos. La gráfica se vería de la siguiente forma:



Si cambiamos el Duty Cycle a 20% escribiendo:

```
Vcon = PWM(2, 0.2, 0.1, 10, 2, 10, 0.01)
```

Obtenemos la siguiente gráfica:



Simulación de turbina con control PWM

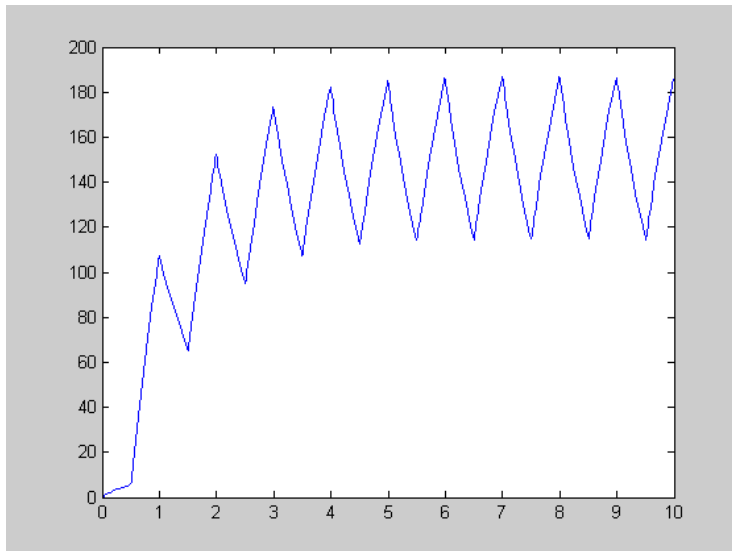
Si alguna de estas señales las utilizamos como voltaje de control de la turbina, podemos simular el controlador electrónico en forma dinámica. A continuación se estudian dos casos:

Caso 1. PWM con frecuencia de 1 Hz

Como caso demostrativo, simulamos un control tipo PWM con frecuencia de 1 Hz. Se utilizaron los siguientes parámetros:

- Tiempo de simulación de 10 segundos
- El viento es constante en 5 m/s
- El control es una señal PWM entre 0 y 10 Volts, con periodo de 1 segundo, Duty Cycle de 50%, y pendiente del 5%.

El resultado de la simulación es el siguiente utilizando ode15s como solucionador:

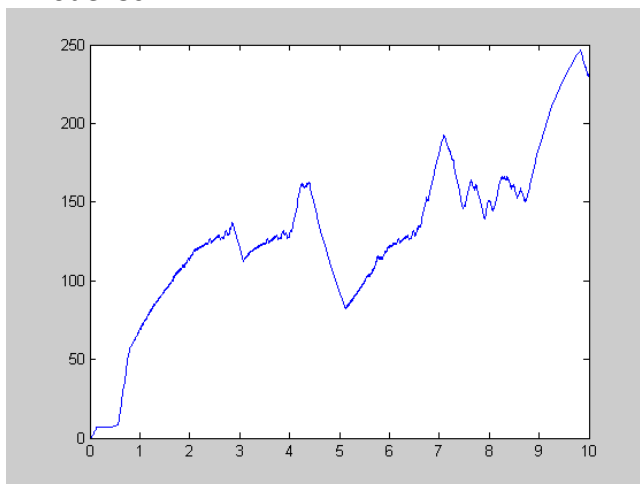


Claramente puede observarse que cada segundo la turbina se frena durante la primera mitad y se desfrena en la segunda.

Caso 2. PWM con frecuencia de 100 Hz

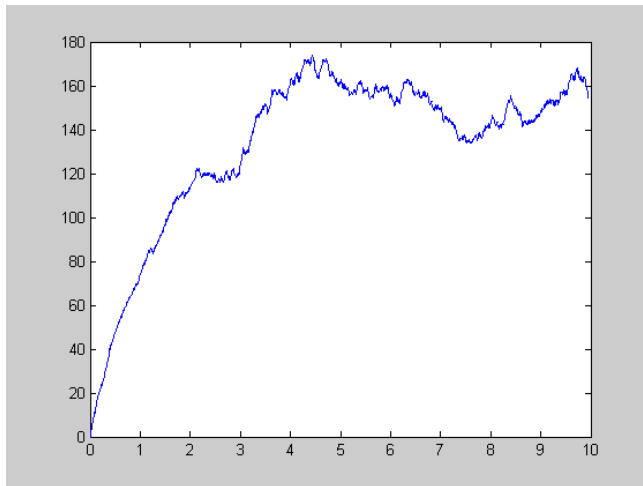
Si ahora simulamos la turbina pero con frecuencia de 100 Hz dejando todos los otros parámetros igual, obtenemos las siguientes gráficas para cada solucionador de la ecuación diferencial.

- ode15s



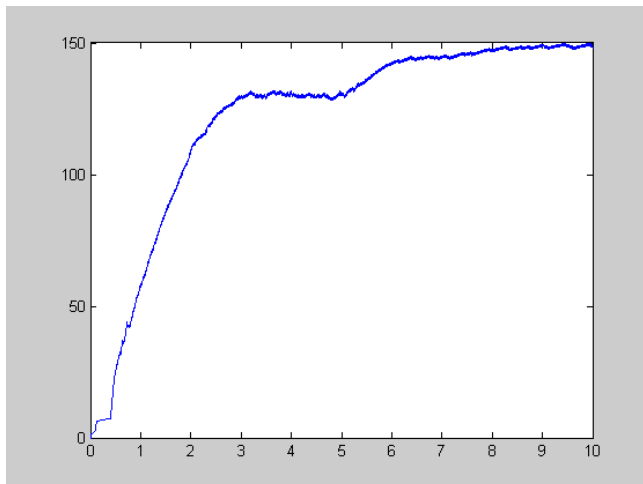
Claramente no hay simulación adecuada

- ode45



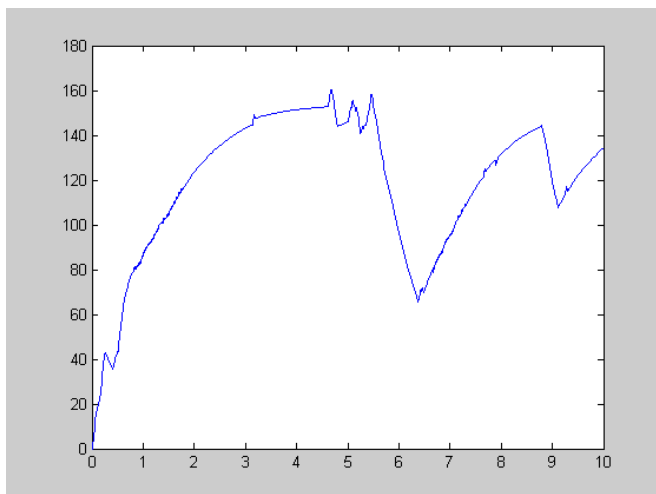
Hay mejor convergencia, aunque la solución oscila

- ode23s



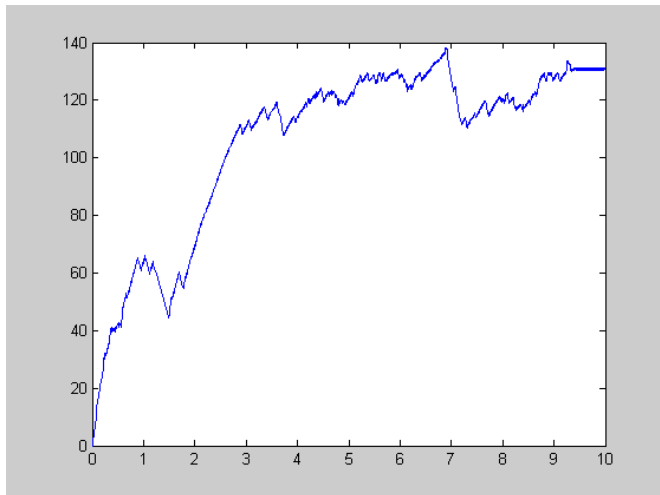
La solución tiene un buen comportamiento, aunque muestra un cambio repentino de la velocidad rotacional a aproximadamente 5 m/s sin que exista un motivo. El sistema con a una velocidad rotacional de aproximadamente 150 rpm.

- ode23t



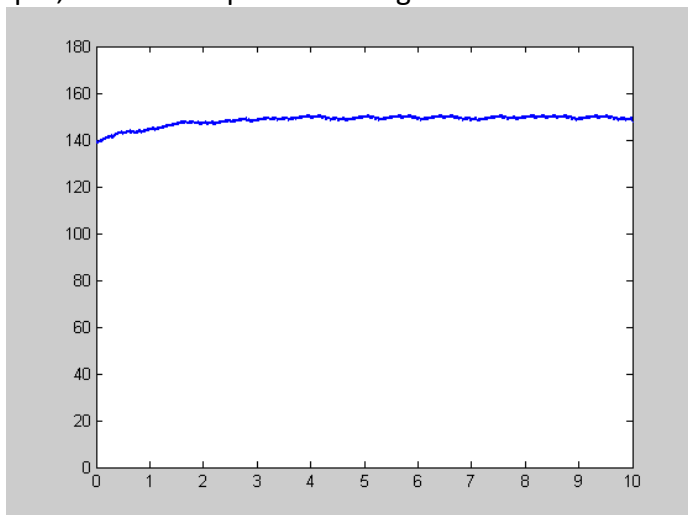
No hay una simulación adecuada

- ode23tb



La simulación no es adecuada

La solución se puede mejorar, haciendo una mejor aproximación de la velocidad rotacional inicial. Utilizando, por ejemplo, ode23s con una estimación inicial de 140 rpm, la solución queda de la siguiente forma:

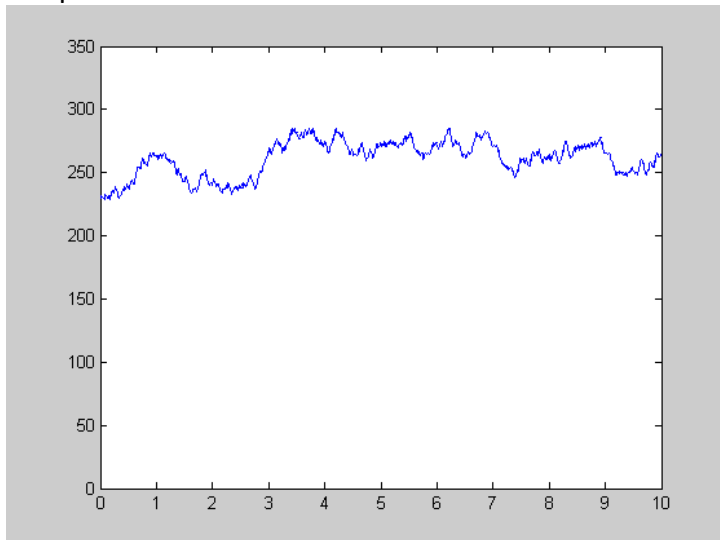


La solución es mucho más estable ya que el problema se hace menos "rígido". La solución tiende a un valor de aproximadamente 150 rpm en estado estable, equivalente a un voltaje en baterías de 23.7 Volts, según el modelo completo:

U _{viento} (m/s)	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
n _s (RPM)												
50	9.2	9.4	9.7	9.4	9.4	9.2	9.0	8.9	8.7	8.6	8.4	8.3
60	10.8	10.6	10.8	11.0	11.0	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.2	10.0
70	12.7	12.2	12.1	12.3	12.5	12.5	12.4	12.3	12.2	12.1	12.0	11.8
80	14.8	14.0	13.5	13.4	13.7	13.9	14.0	13.9	13.8	13.7	13.6	13.4
90	17.2	15.9	15.2	14.9	14.7	15.0	15.2	15.4	15.4	15.2	15.1	15.0
100	19.6	18.2	17.1	16.4	16.0	15.9	16.2	16.5	16.7	16.7	16.6	16.5
110	22.1	20.5	19.1	18.1	17.5	17.2	17.1	17.3	17.7	17.9	18.0	18.0
120	24.7	22.9	21.4	20.0	19.2	18.6	18.2	18.1	18.4	18.8	19.1	19.1
130	27.4	25.3	23.7	22.2	20.9	20.1	19.6	19.2	19.1	19.4	19.8	20.1
140	30.5	27.7	26.0	24.4	22.9	21.8	21.0	20.5	20.1	20.0	20.3	20.8
150	34.1	30.3	28.3	26.7	25.1	23.7	22.6	21.9	21.3	20.9	20.9	21.2
160	0.0	32.9	30.7	29.0	27.4	25.7	24.3	23.3	22.6	22.1	21.7	21.6
170	0.0	35.6	33.2	31.3	29.7	27.9	26.3	24.9	24.0	23.3	22.7	22.4
180	0.0	38.6	35.7	33.7	31.9	30.2	28.4	26.8	25.4	24.5	23.8	23.3
190	0.0	41.8	38.3	36.1	34.2	32.5	30.6	28.8	27.1	25.9	25.0	24.3
200	0.0	46.0	40.9	38.5	36.6	34.7	32.8	30.9	29.0	27.4	26.3	25.4
210	0.0	0.0	43.6	41.0	38.9	37.0	35.1	33.1	31.1	29.2	27.7	26.5
220	0.0	0.0	46.5	43.5	41.3	39.3	37.3	35.3	33.3	31.2	29.2	27.7
230	0.0	0.0	49.5	46.0	43.7	41.6	39.6	37.6	35.5	33.3	31.1	29.2

Esto es evidentemente la mitad del voltaje en baterías

Si la velocidad de viento la aumentamos a 9 m/s, observamos el siguiente comportamiento:



En esta ocasión la mejor simulación la arrojó el ode45 y se utilizó una estimación inicial de 240 rpm

Puede observarse que la velocidad rotacional tiende a un valor de aproximadamente 260 rpm, similar a lo esperado por el modelo en estado estable para un voltaje de 29.9 Volts, nuevamente la mitad del voltaje en baterías.

U _{wiento} (m/s)	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
n _s (RPM)	V _{Bat} (V)															
50	9.2	9.4	9.7	9.4	9.4	9.2	9.0	8.9	8.7	8.6	8.4	8.3	8.2	8.0	7.8	7.7
60	10.8	10.6	10.8	11.0	11.0	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.2	10.0	9.9	9.8	9.6	9.4
70	12.7	12.2	12.1	12.3	12.5	12.5	12.4	12.3	12.2	12.1	12.0	11.8	11.6	11.5	11.4	11.2
80	14.8	14.0	13.5	13.4	13.7	13.9	14.0	13.9	13.8	13.7	13.6	13.4	13.3	13.1	13.0	12.8
90	17.2	15.9	15.2	14.9	14.7	15.0	15.2	15.4	15.4	15.2	15.1	15.0	14.9	14.7	14.6	14.4
100	19.6	18.2	17.1	16.4	16.0	15.9	16.2	16.5	16.7	16.7	16.6	16.5	16.4	16.2	16.1	15.9
110	22.1	20.5	19.1	18.1	17.5	17.2	17.1	17.3	17.7	17.9	18.0	18.0	17.8	17.7	17.5	17.4
120	24.7	22.9	21.4	20.0	19.2	18.6	18.2	18.1	18.4	18.8	19.1	19.1	19.2	19.1	18.9	18.8
130	27.4	25.3	23.7	22.2	20.9	20.1	19.6	19.2	19.1	19.4	19.8	20.1	20.3	20.4	20.3	20.1
140	30.5	27.7	26.0	24.4	22.9	21.8	21.0	20.5	20.1	20.0	20.3	20.8	21.1	21.4	21.4	21.4
150	34.1	30.3	28.3	26.7	25.1	23.7	22.6	21.9	21.3	20.9	20.9	21.2	21.7	22.0	22.3	22.4
160	0.0	32.9	30.7	29.0	27.4	25.7	24.3	23.3	22.6	22.1	21.7	21.6	22.0	22.5	22.8	23.1
170	0.0	35.6	33.2	31.3	29.7	27.9	26.3	24.9	24.0	23.3	22.7	22.4	22.2	22.6	23.1	23.4
180	0.0	38.6	35.7	33.7	31.9	30.2	28.4	26.8	25.4	24.5	23.8	23.3	22.9	22.7	23.1	23.6
190	0.0	41.8	38.3	36.1	34.2	32.5	30.6	28.8	27.1	25.9	25.0	24.3	23.7	23.3	23.1	23.4
200	0.0	46.0	40.9	38.5	36.6	34.7	32.8	30.9	29.0	27.4	26.3	25.4	24.6	23.9	23.6	23.3
210	0.0	0.0	43.6	41.0	38.9	37.0	35.1	33.1	31.1	29.2	27.7	26.5	25.6	24.7	24.1	23.7
220	0.0	0.0	46.5	43.5	41.3	39.3	37.3	35.3	33.3	31.2	29.2	27.7	26.6	25.6	24.8	24.1
230	0.0	0.0	49.5	46.0	43.7	41.6	39.6	37.6	35.5	33.3	31.1	29.2	27.7	26.5	25.5	24.6
240	0.0	0.0	52.7	48.6	46.1	44.0	41.9	39.8	37.7	35.4	33.1	30.9	28.9	27.5	26.3	25.2
250	0.0	0.0	56.7	51.3	48.6	46.3	44.2	42.1	39.9	37.6	35.3	32.8	30.5	28.6	27.1	25.8
260	0.0	0.0	0.0	54.0	51.1	48.7	46.5	44.4	42.1	39.8	37.4	34.9	32.2	29.9	28.0	26.4
270	0.0	0.0	0.0	56.8	53.6	51.1	48.9	46.6	44.4	42.0	39.6	37.0	34.2	31.6	29.1	27.2
280	0.0	0.0	0.0	59.9	56.1	53.5	51.2	49.0	46.6	44.3	41.8	39.1	36.3	33.4	30.6	28.1