

PROPUESTA DE CONTROLADOR CON LOGICA DIFUSA PARA SISTEMA EOLICO¹

Daniel Hoyos, Roberto Farfan², Fernando Tilca y Carlos Cadena
INENCO - Instituto UNSa - CONICET
Universidad Nacional de Salta - CIUNSa
Av. Bolivia 5150 - A4408FVY Salta, República Argentina
FAX 54 387 4255489 - e-mail: hoyosd@unsa.edu.ar

RESUMEN: El presente trabajo tiene por objeto presentar la simulación de un controlador difuso para un sistema de generación eólico, utilizando como variables lingüísticas: intervalos de velocidad de viento, de voltaje en bornes de batería y temperatura. El controlador permite la entrega de carga a la batería poniendo especial cuidado en su vida útil, limitando para ello la intensidad de corriente ante su estado de carga, y considerando que el voltaje de gaseo es función de la temperatura. También tiene en cuenta la seguridad estructural del aerogenerador ante vientos elevados. Se considera que los resultados obtenidos en este simulador de controlador difuso serán de importancia para el avance en su diseño.

Palabras clave: energía eólica, controladores, simuladores, lógica difusa.

INTRODUCCION

Los sistemas eólicos para viviendas unifamiliares de baja potencia, tienen algunas características similares a los sistemas fotovoltaicos. El recurso existente en general es irregular (el viento) por lo tanto se utilizan baterías para acumular energía y el usuario usa en forma irregular la energía suministrada: hay días o momentos donde se utiliza mucha energía y existen otros momentos donde se utiliza poco o nada. Por otra parte son características propias del sistema eólico que las palas del generador deben ser trabadas, en caso que el viento adquiera una velocidad tan alta que sea peligroso para su integridad mecánica, y en caso de que el sistema de acumulación este completo, es conveniente conectar el generador en cortocircuito o a una resistencia pequeña para no permitir el “embalamiento” del sistema. Todo esto implica que el control del mismo es relativamente complicado. Los sistemas eólicos de muy baja potencia en general traen incorporado el controlador, con la opción de utilizar otro si fuera necesario. Los controladores comerciales en general están diseñados para obtener la máxima potencia mediante la regulación de voltaje [Southwest, 2004]. Para un sistema que suministre energía a una vivienda unifamiliar, el controlador de carga debe tener en cuenta, además de los factores intrínsecos del generador, las características del sistema de acumulación (baterías) y del consumo. Por lo tanto un control de este tipo se podría realizar utilizando lógica difusa.

Existen diversas tecnologías para construir un controlador difuso. Entre ellas se pueden nombrar: Microcontroladores, la familia MCU de motorola tiene instrucciones especiales para implementar un controlador difuso [S.S Flores, 2001]. Circuitos integrados controladores de lógica difusa [C. Dualibe et al, 2001]. También se puede realizar utilizando FPGA (Field Programmable Gate Array) que es lógica reconfigurable programando en VHDL [V. H. Grisales et al, 2001]. Para realizar la simulación del controlador difuso existen diversas opciones, entre ellas el Toolbox de Matlab y el toolbox de SCILAB (FISLAB), ambos para lógica difusa.

En este trabajo se presenta la simulación de un sistema de suministro de energía compuesto por un aerogenerador de pequeño porte, el banco de baterías, un controlador difuso y la carga. Mediante este modelo se pretende optimizar un controlador difuso, y se presenta un conjunto de rutinas para simularlo basado en SCILAB.

BATERIAS

Las baterías utilizadas en este tipo de sistema es la de plomo - ácido de descarga profunda. Se utilizó un modelo de comportamiento externo, que permite simular las baterías [Ciemat, 2000], el llamado Modelo Normalizado de Copetti y Chenlo. La evolución para la carga y la descarga antes de iniciarse el gaseo esta definida por la expresión:

$$V = (V_0 + K.Q/C) \pm I.R \quad (1)$$

donde:

- Q: Amper-hora extraído en la descarga
- C: capacidad de la batería, Amper hora
- I: corriente de la batería, en Amper.
- R: resistencia interna, ohm.
- K: coeficiente empírico.
- V₀ = tensión inicial de la batería.

1 Parcialmente financiado por CIUNSa

2 Estudiante adscripto al proyecto

Este modelo se basa en algunos parámetros considerados generales: **C10** es la capacidad de carga de la batería (bajo un régimen de descarga en diez horas), **EDC** es el estado de carga de la batería, **DT** diferencia de temperatura respecto de los 25 C. Suministra un conjunto de expresiones que permiten simular el comportamiento de la batería: tensión de descarga, tensión de carga y de sobrecarga, tensión de gaseo, máxima tensión de la batería. Además provee expresiones de la capacidad de carga y del rendimiento.

La ecuación normalizada de tensión de descarga, que representa el fenómeno de descarga de la batería, es:

$$V_d = (2.085 - 0.12(1 - EDC)) - 1/C10 \cdot (4/(1+i^{1.3}) + 0.27/(EDC^{1.5}) + 0.02) \cdot (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (2)$$

La ecuación normalizada de tensión de carga, expresión (3), representa el fenómeno de carga de la batería hasta el momento del comienzo de gaseo, a partir del cual la tensión de la batería sigue otra expresión.

$$V_c = (2 + 0.16 \cdot EDC) + 1/(C10) \cdot (6/(1+i^{0.86}) + 0.48/(1 - EDC)^{1.2} + 0.036) \cdot (1 - 0.0025 \cdot \Delta T) \quad (3)$$

La ecuación final de carga representa la máxima tensión a partir de la cual se producen daños irreversibles en la batería:

$$V_{fc} = (2.45 + 2.011 \cdot \ln(1 + I/C10)) \cdot (1 - 0.002 \cdot \Delta T) \quad (4)$$

La ecuación de la tensión de gaseo representa la tensión a partir de la cual la batería empieza a gasificar

$$V_g = [2.24 + 1.97 \cdot \ln(1 + I/C10)] \cdot (1 - 0.002 \cdot \Delta T) \quad (5)$$

El proceso de sobrecarga en la batería está representado por la ecuación normalizada de la tensión en los bornes, expresión (6), donde el tiempo t está definido por la (7):

$$V = V_g + (V_{fc} - V_g) \cdot [1 - e^{-(Q - 0.95C)/(I \cdot t)}] \quad (6)$$

$$t = 17.3 / (1 + 852 \cdot (I/C10)^{1.67}) \quad (7)$$

Para simular este sistema se utilizó un programa matemático denominado SCILAB el cual puede ser utilizado para estos fines; se generó una librería con estas expresiones y luego se simuló distintos estados de carga.

En la Figura 1 se muestra el resultado de simular la tensión de una batería de 100 Ah de capacidad, partiendo de un estado de carga 0, se supuso que la temperatura ambiente es constante e igual a 35 C, con distintas corrientes de carga desde 10 A (1ª curva) hasta 1 A (última curva). La línea rosada (superior) representa la tensión final de carga de la batería y la línea verde (inferior) representa la tensión de gaseo. La corriente es un parámetro y crece hacia arriba.

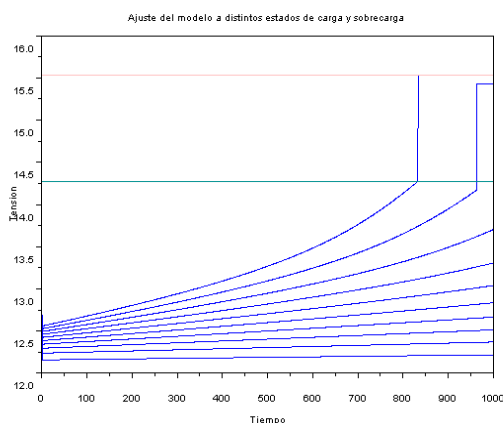


Figura 1: curva de carga con distintas corrientes

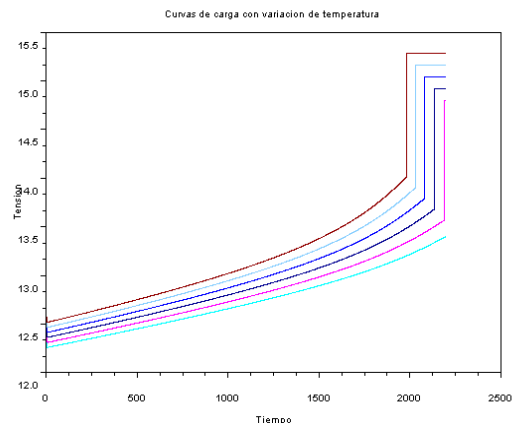


Figura 2: curva de carga a distintas temperaturas

En la figura 2 se muestra curvas de carga suponiendo las condiciones iniciales anteriores pero variando la temperatura. La curva superior (marrón) es a 25 C, y la última (celeste) es a 45 C. Se puede observar que al aumentar la temperatura la tensión a los bornes de la batería baja.

GENERADOR EOLICO

Se supone el uso de un aerogenerador del orden de 1.10 m de diámetro, que tiene un alternador de imán permanente donde la tensión de salida es proporcional a la velocidad que giran las palas. Los efectos debido a la inercia se tienen en cuenta como un retraso T y el roce como un rendimiento ($\eta=0.95$); al par resistente se lo considera proporcional a la corriente. La expresión utilizada sería:

$$V = K_{vien} * \eta * v(t-T) - K_{mag} * i \quad (8)$$

donde:

V : tensión en voltios

K_{vien} : constante de proporcionalidad entre la velocidad de viento (con su densidad) y la tensión

$v(t)$: velocidad de viento en m/s.

K_{mag} : constante de proporcionalidad entre el par resistente y la corriente i .

SISTEMA BATERIA - AEROGENERADOR

Entonces si se supone un circuito como el de la figura se tiene:

$$E = i * R_i + i * R_{bat} + V_{bat} \quad (9)$$

V_{bat} es la tensión a los bornes de la batería y responde a las ecuaciones descritas en la sección anterior; i es la corriente; R_i y R_{bat} son las resistencias internas del generador y de la batería; E es la tensión generada por el aerogenerador.

Se simuló el circuito y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 3, en la que se puede observar en la primera grafica un conjunto de ráfagas de viento que generan una tensión sobre el aerogenerador representado en la segunda grafica; la carga de la batería en el siguiente gráfico donde se ve el aumento de tensión hasta su destrucción; la ultima curva corresponde a la corriente que se entrega a la batería.

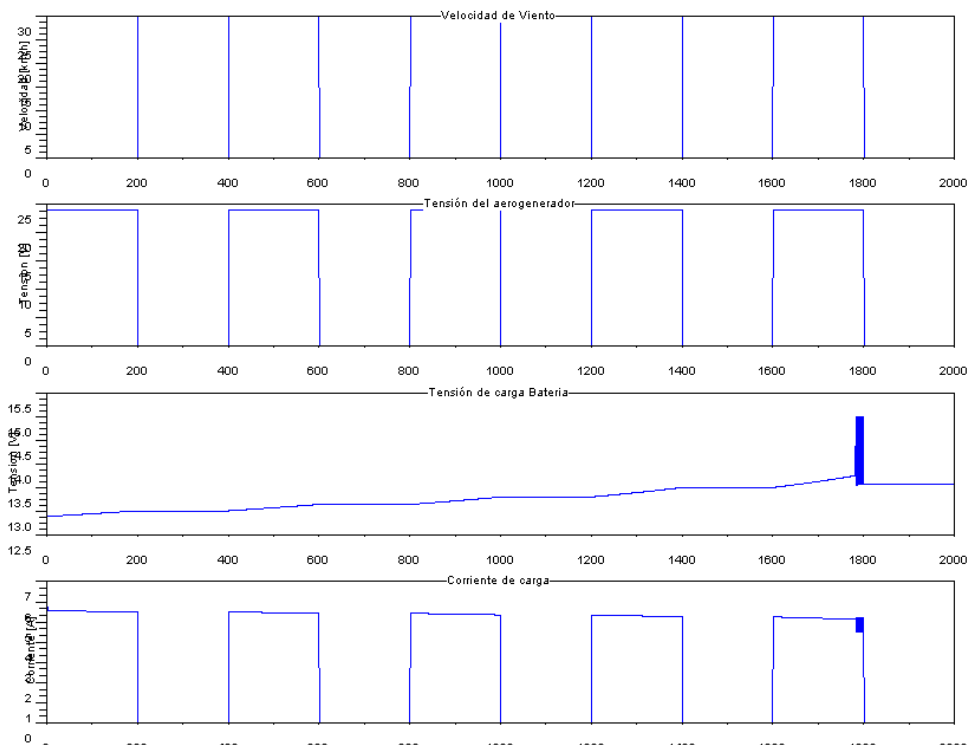


Figura 3: Simulación de un sistema aerogenerador batería

CONTROLADOR DIFUSO

Los conjuntos difusos fueron introducidos por L.A. Zadeh en 1965 para procesar y/o manipular información y datos afectados de incertidumbre no probabilística. Fueron diseñados para representar matemáticamente incertidumbre y vaguedad, y proporcionar herramientas formalizadas para trabajar con la imprecisión intrínseca en muchos problemas. La idea de Zadeh

es hacer que el rango de valores de pertenencia de un elemento a un conjunto pueda variar en el intervalo [0,1] en lugar de limitarse a uno de los valores del par {0,1} (o lo que es lo mismo Falso, Verdadero). A continuación extiende los operadores clásicos (operadores lógicos: and, or) a la nueva formulación, probando que la formulación así obtenida extiende la lógica (Teoría de Conjuntos) clásica.

Un sistema de control de lógica difusa basado en microcontrolador tiene dos partes. La primera es un núcleo de inferencia difusa, el cual es ejecutado periódicamente para determinar las salidas basados en las entradas actuales del sistema. La segunda parte del sistema es una base de conocimiento la que contiene funciones de pertenencia y Reglas [S.S Flores, 2001]. Para nuestro problema se deben analizar las distintas variables que intervienen en un sistema eólico. Las variables significativas en lógica difusa se denominan variables lingüísticas; en este sistema son: velocidad de viento, tensión de bornes de la batería, temperatura.

La temperatura es muy importante debido a que su variación podría provocar que la batería supere la tensión de gaseo y empiece a evaporar el sistema. Por lo tanto en base a estas tres variables se definieron los valores lingüísticos para cada variable, a saber: excesivo, abundante, medio, poco, muy poco. Como se muestra en la Figura 4 la “variable lingüística” “viento” tiene cinco valores o funciones de pertenencia, que tienen zonas donde es 1, 0, o un valor intermedio.

Analicemos la primera a la que podríamos denominar *poco viento* se muestra en azul (primera de la izquierda) y engloba las velocidades de viento entre 0 y 2,3 m/s, en esta zona toma valor 1 y entre 2,3 y 2,6 m/s es linealmente decreciente es decir que puede tomar un valor intermedio.

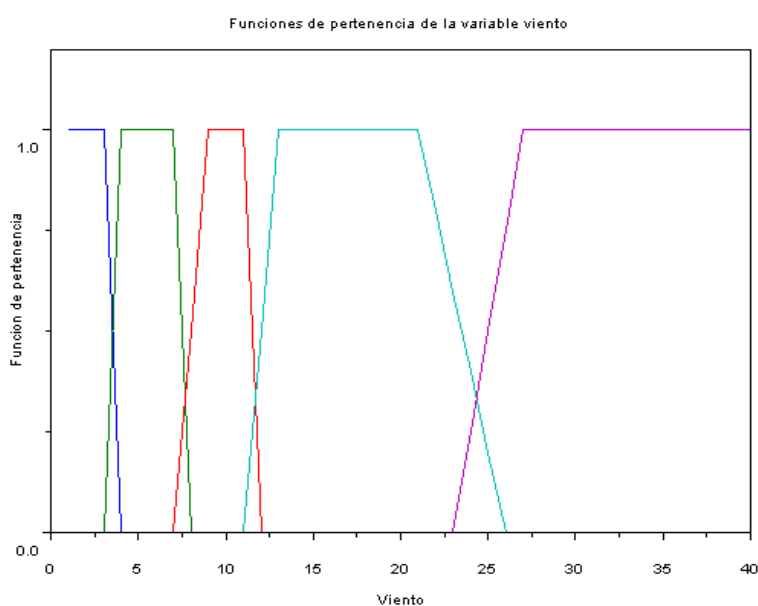


Figura 4: Funciones de pertenencia de la variable viento

El resto de las funciones de pertenencia se muestran en la Tabla 1. Los valores de la tabla surgen de la conveniencia de disponer estos valores lingüísticos, por ejemplo si existe mucho viento el sistema se debe trabar pero existe una zona en donde si esta muy descargada la batería se puede seguir cargando sin dañar al aerogenerador.

Valor lingüístico	Zona en 1 (m/s)	Entre 0 y 1 (m/s)	Zona en 0 (m/s)	Zona entre 1 y 0 (m/s)
Poco viento	0 – 2.3	--	2,6 – adelante	2,3 – 2,6
Medio poco viento	2.5-6	2.3- 2.5	0 - 2,3 y 7- adelante	6 – 7
Medio viento	8- 10	6 – 8	0-6 y 11- adelante	10-11
Abundante viento	12 - 20	10-12	0-10 y 25 - adelante	20-25
Excesivo viento	26 - adelante	22 – 26	0- 22	--

Tabla 1: intervalos de la velocidad del viento utilizados.

Para la “variable lingüística carga” que representa la tensión en los bornes de la batería se definieron también cinco valores lingüísticos como se muestra en la Tabla 2:

Valor lingüístico	Zona en 1 (Volt)	Zona entre 0 y 1	Zona en 0	Zona entre 1 y 0
Poca Carga	0 – 10	--	11 – adelante	10- 11
Medio poca carga	11.5-12	10.5 -11.5	0 – 11,5 y 12.5 -adelante	12-12.5
Media carga	12.5- 12.7	12-12.5	0-12 y 13- adelante	12.7-13
Abundante carga	13 – 13.5	12.7-13	0-12.7 y 14 - adelante	13.5-14
Excesiva carga	14 - adelante	13.5,14	0- 14	--

Tabla 2: intervalos de voltaje de bornes de batería.

Se debe recordar, del análisis del modelo de la batería, que la temperatura cambia la tensión de gaseo que es el parámetro fundamental para proteger la batería de su destrucción. Entonces incluir la temperatura ambiente cerca de la batería es importante. Por esta razón se definió la variable lingüística Temperatura, con los valores de la Tabla 3:

Valor lingüístico	Zona en 1 (C)	Zona entre 0 y 1	Zona en 0	Zona entre 1 y 0
Baja Temperatura	0 – 18	--	22 – adelante	18- 22
Media Temperatura	20 -30	17 -20	0 – 17 y 32 -adelante	30-32
Alta temperatura	34- adelante	32-34	0- 34	--

Tabla 3: intervalos de temperatura ambiente cerca de la batería.

PROCESO DE CODIFICACIÓN (FUZZIFICACION)

Consiste en obtener los valores de la variable lingüística, por ejemplo para la velocidad de viento 7, tenemos:

Valor lingüístico	% I del aerogenerador
Muy poca velocidad	0
Poca velocidad	0.3
Media velocidad	0.3
Abundante velocidad	0
Excesiva velocidad	0

Tabla 4: funciones de pertenencia de la variable lingüística velocidad de viento cuando es 2.45 m/s.

BASE DE CONOCIMIENTO

En la Tabla 5 se definen las bases de conocimiento del controlador, que es la forma en que se deben comportar las salidas del sistema, en este caso la corriente que puede entregar el aerogenerador ante distintas situaciones. El número propuesto es el porcentaje que debe pasar del máximo que en ese momento está generando. Con este fin se tuvo en cuenta las simulaciones realizadas en la sección anterior y la experiencia en el tema. Se analizan diferentes situaciones para justificarlas.

En el caso de muy poco viento el aerogenerador gira, pero ante la corriente generada, la fuerza contraelectromotriz lo va frenando, por lo que se entrega muy poca carga. En caso de que exista viento en exceso, por protección, el aerogenerador se traba automáticamente y por lo tanto tampoco debe entregar carga. Si el sistema está cargado no es conveniente entregar mucha carga, porque para aumentar la vida útil de la batería la carga se debe realizar suavemente. Solamente es aconsejable un máximo de carga cuando existe mucho viento y la batería esta descargada o poco cargada.

Carga - viento a temperatura < 20 C	Muy poco viento	Poco viento	Medio	Suficiente viento	Demasiado
Muy poca carga	0	50	70	100	0
Poca carga	0	10	50	70	0
Carga media	0	10	10	50	0
Abundante carga	0	10	10	10	0
Excesiva carga	0	0	0	0	0

Tabla 5: porcentaje de carga por arriba del máximo que el controlador debe permitir entregar.

En esta tabla se presentan solamente dos variables, y en el controlador se utilizaron tres, la tercera variable es la temperatura. Para poder utilizarla se necesita una matriz de tres dimensiones, o sea dos tablas similares a la mostrada pero que tienen que tener en cuenta que al aumentar la temperatura, la tensión de gaseo disminuye, por lo tanto los coeficientes de “carga abundante” deben ser menores que los mostrados en la tabla.

SIMULACION DEL PROCESADOR DIFUSO

A partir de este momento se debe definir el procesador; en este caso se utilizara un procesador de Sugeno [Dualibe et al, 2001]. Se buscan los valores lingüísticos (funciones de pertenencia) distintos de cero para las tres variables. Las entradas del sistema son velocidad de viento, tensión en bornes de batería y temperatura ambiente, entonces el controlador, una vez que realice las mediciones de estas variables, realizará el proceso de codificación (fuzzificación) de las entradas. Una vez dentro del núcleo de inferencia difusa se procede a comparar los valores de entrada del sistema con las funciones de pertenencia, devolviendo el grado de verdad de cada variable.

Las entradas difusa (entradas del sistema ya codificadas) deberán evaluarse por medio de una lista de reglas que forman la base del conocimiento. En esta etapa de evaluación del sistema, se procede a utilizar dos operaciones matemáticas que se

denominan *and difusa* y *or difusa* que corresponden a buscar un mínimo y un máximo respectivamente. La fuerza de disparo es el valor mínimo de las verdades que intervienen para disparar una determinada regla de tal manera que aquí interviene la operación *and difusa*. Las reglas determinan una consecuencia en la salida del sistema y tienen un valor asignado de tal forma que la verdad de la salida difusa es la máxima de las verdades, interviniendo en esta elección la operación *or difusa*. La decodificación utiliza una función de membresía para la salida que combina las entradas para obtener así una salida compuesta del sistema.

A continuación se realiza la simulación para datos de velocidad de viento (promedios horarios) medidos en la estación anemométrica del aeropuerto de Esquel (42.56° Latitud sur y 71.09° Longitud Oeste, a 797 msnm), provincia de Chubut, correspondientes a 450 horas. Se supuso una batería de 100 Ah, una temperatura ambiente entre 20 y 30 C, un estado de carga inicial de 50%, la resistencia interna de la batería de 1 ohm, la resistencia interna del aerogenerador 1 ohm, el retardo del aerogenerador nulo, a 30m/S la tensión generada por el aerogenerador es 16 Volts.

Los resultados de la simulación están indicando en la figura 5.

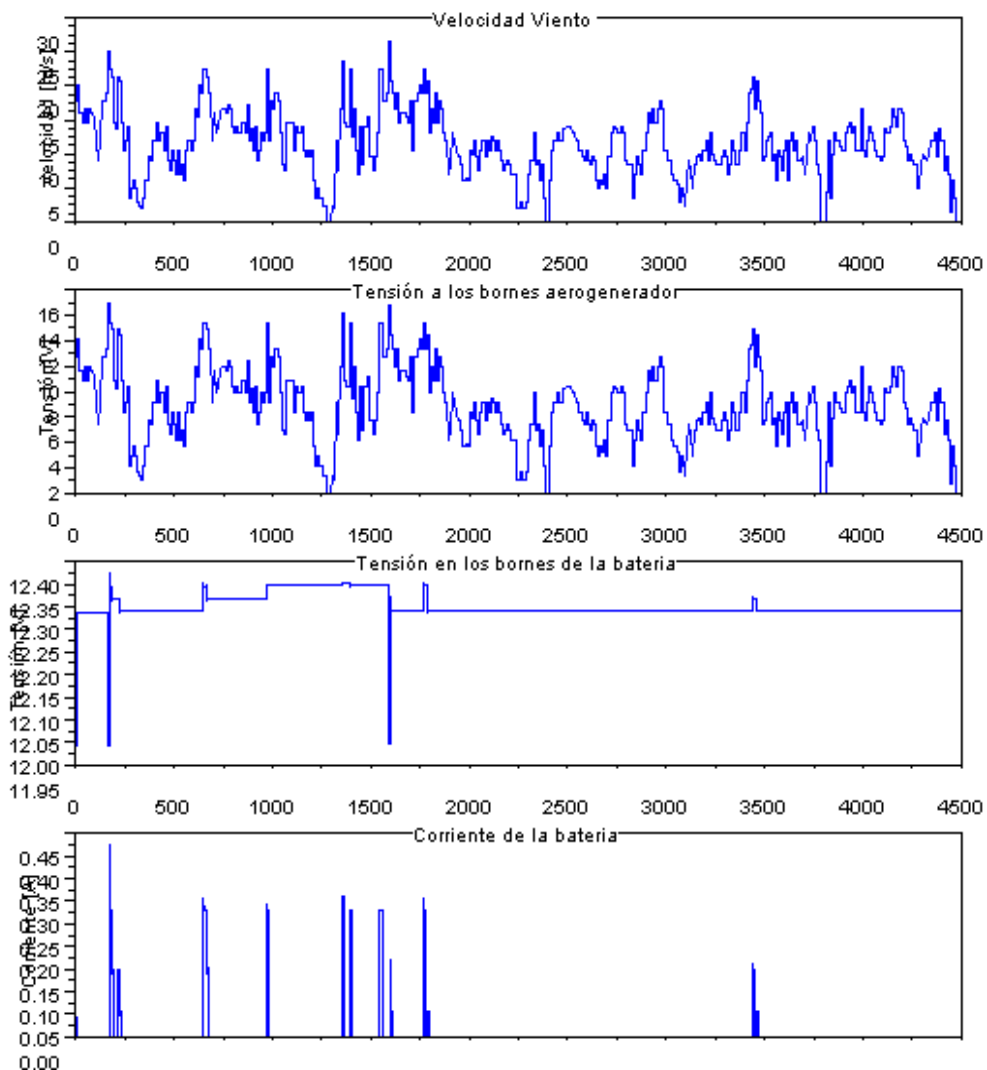


Figura 5: Simulación de carga de una batería de 100 Ah utilizando datos de viento medidos de Chubut

CONCLUSIONES

Se ideó una simulación que representa aproximadamente la curvas de carga y descarga de una batería de plomo ácido, teniendo en cuenta un conjunto de factores. También se construyó y probó un modelo muy simple de aerogenerador y un modelo un poco más sofisticado que tiene en cuenta la inercia mecánica, pero como el mismo no agregaba mucha más información de la necesaria para el sistema, no fue implementado, construyéndose un controlador difuso que responde en forma adecuada.

Seguendo esta simulación se está construyendo un controlador en base al microcontrolador 18F452 programado en lenguaje C, parte del objetivo de este trabajo es tratar de obviar el uso de la tercer variable, la temperatura, lo que hasta ahora no se puede hacer. Tampoco se puede prescindir de la tensión de gaseo ni de la velocidad de viento. La misma plantea problemas de diseño importantes, requiere de la existencia de un sensor, pero se puede prescindir del mismo midiendo la tensión de circuito abierto que entrega el aerogenerador. Por lo anteriormente dicho el estudio del comportamiento dinámico del aerogenerador es muy importante en una etapa posterior.

REFERENCIAS

- Manual del Usuario AIRX (2004) Southwest WindpowerH. Grisales , J. E. Bonilla, M. A. Melgarejo. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN CONTROLADOR DIFUSO BASADO EN FPGA. 2001 VII Workshop Iberchip Montevideo.
- Salvador Saucedo Flores (2001) SOPORTE PARA LÓGICA DIFUSA SEPI ESIME
- Carlos Dualibe Paul Jespers and Michel Verleysen (2001) On Designing Mixed-Signal Programmable Fuzzy Logic Controllers Embedded Subsystems in Standard CMOS Technologies SBCCI'2001 proceedings - 14th Symposium on Integrated Circuits and System Design.
- Ciemat (2000) Series Ponencias

ABSTRACT: This work shows the simulation of a diffuse controller for a small eolic generation system, using intervals of wind speed, of voltage in battery terminals and temperature, as linguistic variables. The controller allows the delivery of electric current to the battery putting special care in his useful life. For this it controls the current intensity according to their load state, and it considers that the gas voltage of battery is function of the temperature. It also keeps in mind the structural security of the wind generator before high winds. The results obtained in diffuse controller's simulation will be of importance to advance in their design and construction.

Keywords: wind energy, controllers, shammers.