

Reporte de laboratorio

19/07/2022

Descripción: Primera medición de potencia de la turbina eólica de la compañía *Missouri Wind and Solar*, realizadas utilizando el túnel de viento en la Universidad de Costa Rica (UCR).

Hora de inicio: 8:30 am

Hora de finalización: 5:00 pm

Participantes: Carlos Luis Arias Arguedas (LIENE)

Carlos Echandi Jara (LIENE)

Alfonso Rodríguez Pereira (LIENE)

Gustavo Richmond Navarro (LIENE)

Supervisor de laboratorio: M.Sc. Eduardo Alfaro Ureña

Ubicación: Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica

Laboratorio: Transferencia de Calor, equipado con túnel de viento

Resumen

El 17 de julio se visitaron las instalaciones del laboratorio de transferencia de calor en la ciudad de la investigación de la Universidad de Costa Rica (UCR). El objetivo era iniciar el proceso de caracterización de la turbina de eje horizontal del Laboratorio de investigación en energía eólica (LIENE). La metodología debió ser alterada debido a situaciones imprevistas, como la incapacidad del tacómetro de medir la velocidad angular de la turbina, ausencia de un estroboscopio y la inestabilidad de la turbina para velocidades del motor del túnel de viento superiores a 1200 rpm. Los resultados muestran una incapacidad de la turbina, para las velocidades probadas, de acercarse a su potencia nominal de 500 W. Finalmente, se recomienda un análisis posterior de la significancia de los resultados obtenidos sobre la repetibilidad del experimento y la variabilidad para las mediciones de los puntos muestrales. Se recomienda también la construcción de un pedestal que permita probar la turbina de forma segura para velocidades del motor mayores a 1200 rpm.

Metodología

El experimento se realizó el día 19 de julio del 2022 dentro de las instalaciones de la UCR, específicamente dentro del laboratorio de transferencia de calor de la escuela de ingeniería mecánica, ubicado dentro de la *Ciudad de la Investigación* de la sede Rodrigo Facio de la universidad. A continuación, se detallarán los materiales necesarios en un inicio para el experimento, los cuales fueron solicitados dentro de la escuela de ingeniería electromecánica del Tecnológico de Costa Rica. Los materiales solicitados dentro de la UCR o llevados por los participantes serán especificados cuando corresponda.

Materiales:

- 3 resistencias de 500 W (#15863, #15864 y #15865)
- 3 multímetros de mano
- 6 cables banana-banana
- 1 rectificador de corriente para la turbina (la turbina produce un voltaje trifásico, hay que pasarlo a DC)
- 1 tacómetro
- 1 estroboscopio (pedido en la UCR)
- 1 cinta para recubrir las conexiones (llevada por los integrantes)
- 1 carrito que sirvió como base para montar la turbina (pedido en la UCR)
- 4 sargentos para asegurar la turbina al carrito (pedidos en la UCR)
- 2 ligas para atar adicionalmente el carrito al túnel y sujetarla (pedidos en la UCR)
- 1 anemómetro de hilo caliente

Procedimiento:

El procedimiento primero requiere la construcción del siguiente circuito:

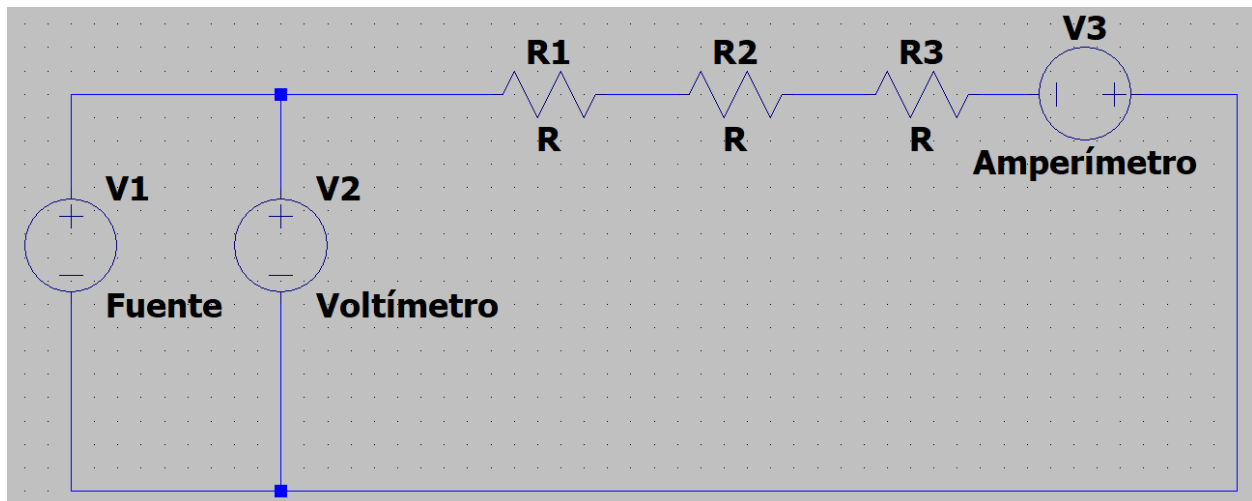


Figura 1: Diagrama del circuito construido

El montaje experimental final se vio de la siguiente forma:

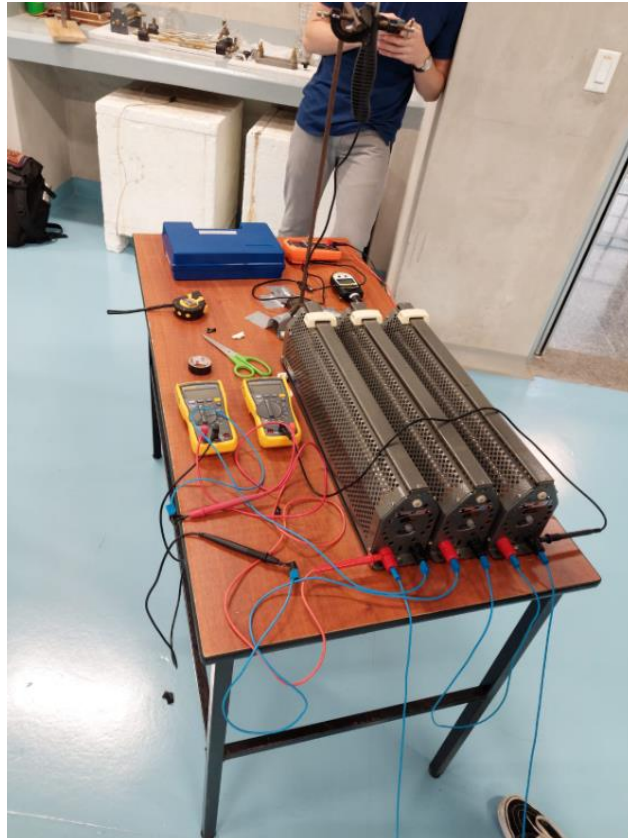


Figura 2: Montaje de las resistencias con los dos multímetros

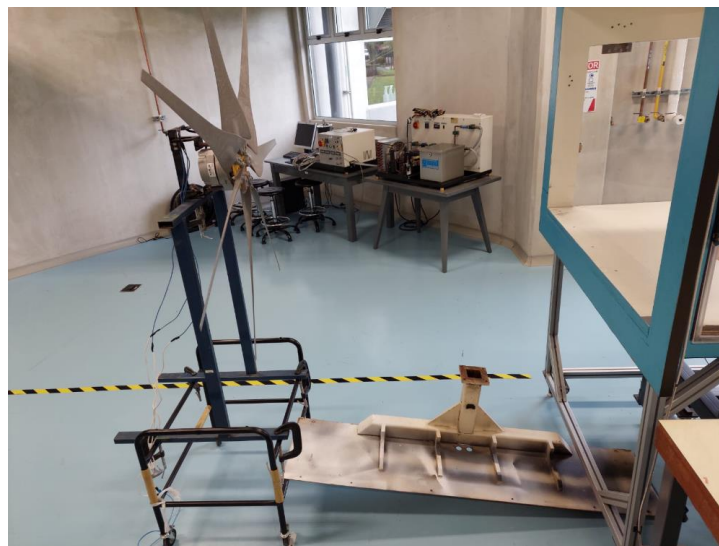


Figura 3: posicionamiento de la turbina con el carrito

El voltímetro y el amperímetro en la figura 1 corresponden a dos de los multímetros colocados en los modos respectivos para medir tensión y corriente de la fuente. La fuente es la salida en corriente directa del rectificador, el cual se conecta de forma sencilla a la salida trifásica de la turbina. La toma de datos se había planteado de la siguiente forma, pero fue necesaria alterarla

el día del experimento (eventualmente se quiere realizar exactamente este procedimiento, cuando sean atendidas las recomendaciones):

La frecuencia de muestro del túnel se colocará en 10 Hz, según lo que ha investigado anteriormente el profesor Richmond. Para una velocidad de viento específica, se observará el cambio de la tensión y de la corriente en los multímetros, se realiza un cálculo aparte de la potencia que se está obteniendo, se desconecta el circuito y se elevan y bajan las resistencias utilizando el tercer multímetro para medirlas, se vuelven a conectar y se realiza otro cálculo aparte de la potencia, esto se repite hasta encontrar el punto donde se disipe la máxima potencia y se anotará. Encontrado este punto, se tomará un video de 6 s de los multímetros y se anotarán 4 datos de corriente y tensión con los dos multímetros en el circuito para la velocidad en cuestión (1 dato cada 2 s). También, se realizará una única medida de la velocidad angular con el estroboscopio en ese momento y se anotará. Este procedimiento se repite desde la velocidad mínima del túnel (alrededor de 9,5 m/s), hasta la máxima (alrededor de 17,5 m/s). Este mismo procedimiento se realizaría bajando la velocidad del túnel.

No obstante, el procedimiento fue alterado y fue el siguiente:

Primero, el eje de la turbina se posicionó en (-1.32 m, 0.609 m, 0.45m) en un sistema de coordenadas xyz utilizando de referencia el origen marcado en el túnel en sí. Se realizó una primera definición de la resistencia aproximada con la cual se disipaba la máxima potencia y se llevó a cabo todo el experimento con este valor. Luego, una persona prende el túnel y esta vigila la velocidad del viento hasta que esta llegue a un valor estable, también es necesario que se mantenga lista para utilizar el botón de parada de emergencia. Una segunda persona controla la velocidad del motor, colocándola inicialmente a 1000 rpm (el mínimo que permite) y subiéndola 20 rpm cada vez que quien está en la computadora le indique. Finalmente, una tercera persona se coloca cerca de la turbina, donde está construido el circuito, y realiza la toma de datos tal como se indica en el primer procedimiento que se había planteado originalmente. Quien toma los datos le indica a quien esté en la computadora que finalizó la toma del video y luego este le indica a quien maneja el motor que suba las revoluciones. Esto se repitió desde 1000 rpm hasta 1200 rpm y luego de 1200 rpm a 1000 rpm con el fin de analizar la histéresis del motor. No se midió la velocidad angular debido a dificultades en el uso del tacómetro y la ausencia de un estroboscopio que se obtuvo hasta después. Los multímetros utilizados en la toma de datos se colocaron así para la grabación del video:



Figura 4: Montaje de los multímetros para la toma de los videos, la calculadora servía para especificar las revoluciones del motor para cada video

Luego, se hizo una toma de datos utilizando tres puntos para analizar la resistencia para la máxima disipación de potencia. En 1000 rpm, 1100 rpm y 1200 rpm se determina con cálculos rápidos la resistencia donde la potencia es máxima, se apunta y luego se toma el video de misma forma para apuntar los datos posteriormente. Esto solo se realizó subiendo las revoluciones del motor y no bajándolas.

Todo este procedimiento se repitió una vez.

Para el análisis, se transcriben los datos según el procedimiento indicado antes a una hoja electrónica de Excel. Una vez transcritos los datos, se promedian las cuatro muestras de tensión y corriente para calcular la potencia mediante la fórmula:

$$P = I * V \quad (1)$$

Donde P es la potencia, I la corriente y V la tensión. También, se puede calcular la carga a la que está sometida la turbina en circuito, utilizando ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde R es la resistencia equivalente del circuito en serie, la cual toma en cuenta principalmente las resistencias dedicadas, con un pequeño aporte de la resistencia intrínseca de los cables.

Hecho esto con la primera y segunda iteración de los datos, se calcula la variación de la potencia en la subida de las revoluciones en comparación con la bajada de las revoluciones con la fórmula del porcentaje de error.

$$Variación = \frac{|P_{subida} - P_{bajada}|}{P_{subida}} * 100\% \quad (3)$$

Esto se hace para analizar el comportamiento de la histéresis del sistema túnel-turbina.

Luego, se calcula por aparte el coeficiente de variación de las muestras de datos de corriente y tensión para cada serie de revoluciones muestreadas. Este coeficiente se calcula con:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \quad (4)$$

Con el coeficiente de variación será posible apreciar cuanto varían las mediciones de los multímetros y analizar si la estabilidad de estos es o no despreciable.

Aparte de estos cálculos, se grafican los resultados de potencia y se presentan para su comparación directa.

Notas sobre el procedimiento

Durante todos los resultados se están usando las revoluciones del motor como variable independiente, debido a que el día del experimento se hizo impráctico estar midiendo la velocidad del viento para cada cantidad de revoluciones en específicamente el punto donde se colocaba la turbina. El día que se hizo el experimento se hizo una prueba rápida con el anemómetro de hilo caliente y se encontró que el valor de la velocidad del viento reportada por el Pitot del túnel no coincidía con la velocidad del viento alrededor del punto donde se colocaba el eje de la turbina. La diferencia era de aproximadamente 2 m/s.

La estabilidad de la turbina para RPMs mayores a 1200 rpm era una gran preocupación. El túnel de viento tiene capacidad hasta para 1700 rpm, pero la velocidad en 1200 rpm es tal que el montaje experimental se veía demasiado inestable y había gran preocupación sobre la seguridad de los participantes. Por esto se decidió que para la próxima vez que se vaya a ir a experimentar a la turbina se debe construir un pedestal que logre sostener bien la turbina expuesta a altas velocidades de viento.

En las pruebas de resistencia para máxima disipación de resistencia se encontró que cuando se desconectaba el experimento y se hacía una medición continua con el multímetro de la resistencia del sistema, la resistencia disminuía con el tiempo. Por el momento no se conoce cual es la razón de este comportamiento, los componentes del sistema cualitativamente no se sentían calientes al tacto como para atribuirle inmediatamente este comportamiento a la temperatura (la cual se espera que aumente cuando hay corriente que fluye por el sistema).

En la segunda prueba de las resistencia para la máxima potencia, se eliminó del sistema la resistencia #15864 puesto que estaba exhibiendo un comportamiento extraño. A la hora de colocar algo de peso sobre su parte superior, subía el valor de la resistencia medida por el multímetro. Se desconoce si la resistencia está totalmente en buen estado, por lo que se decidió

eliminar bajo la consideración que dos resistencias eran suficientes para realizar el experimento y la tercera estaba colocada de forma redundante.

Resultados y análisis

Potencia y análisis de histéresis

Antes de presentar los resultados, en el anexo 1 se encuentran las tablas de datos generadas que contienen las mediciones realizadas, así como los cálculos realizados en cada serie de datos.

Las gráficas con los resultados de la potencia son las siguientes, en la figura 5 se presenta una gráfica donde está la potencia en función de las revoluciones del motor para la primera iteración de mediciones, en la 6 se presenta lo mismo para la segunda iteración y en la 7 se comparan las dos iteraciones.

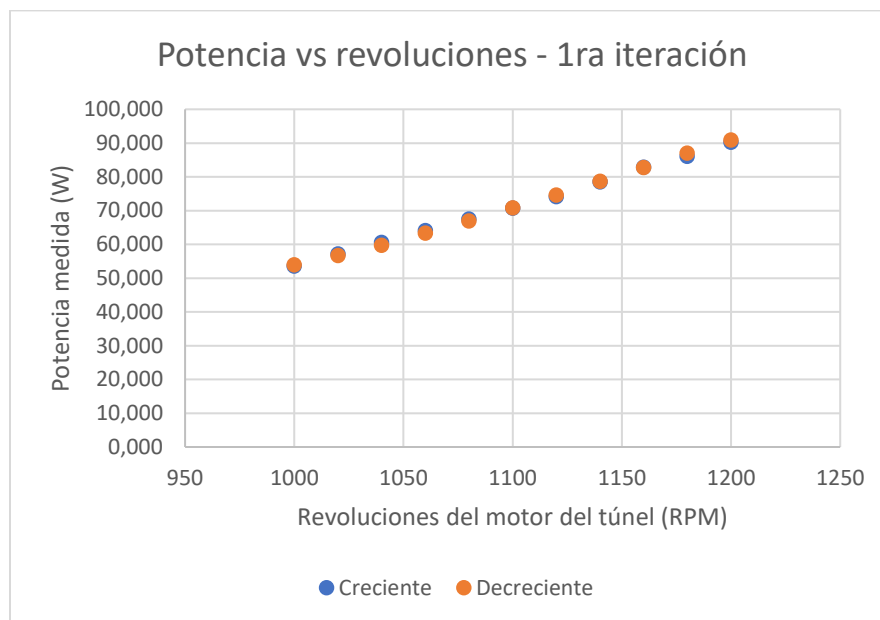


Figura 5: Resultados de potencia vs revoluciones del motor en la primera iteración

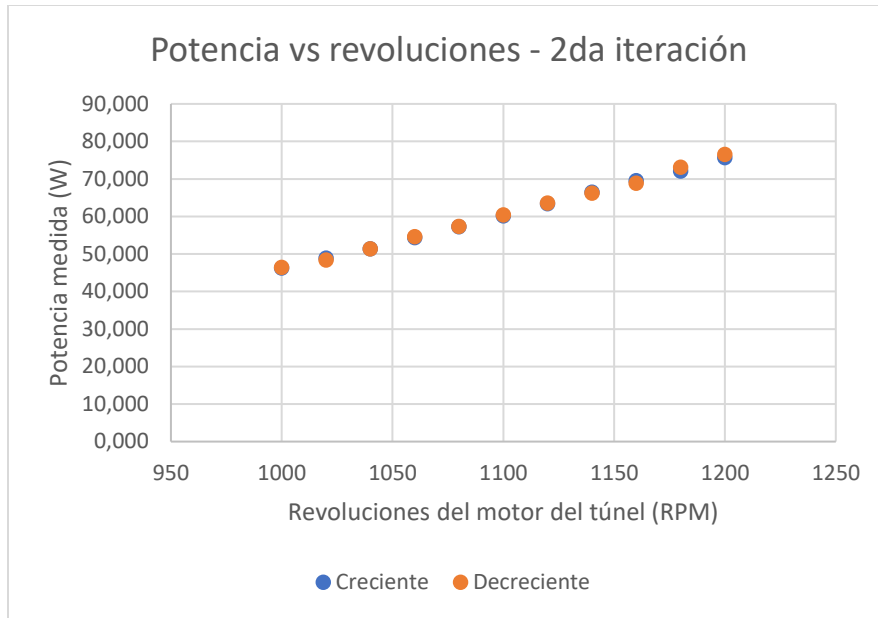


Figura 6: Resultados de potencia vs revoluciones del motor en la segunda iteración

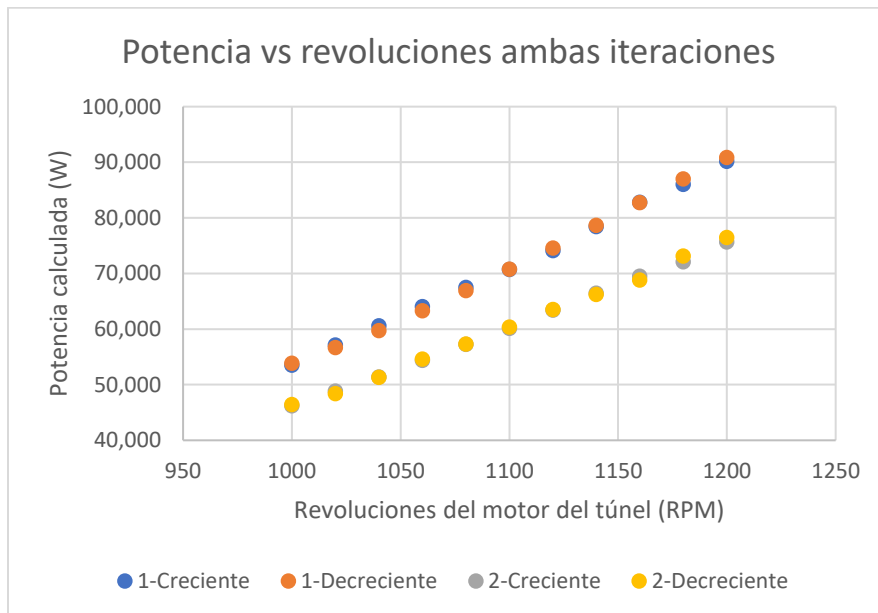


Figura 7: Resultados de la potencia en ambas iteraciones

Evidentemente hubo una reducción en la potencia producida por la turbina. Esto por el momento no se puede determinar si está asociado a los valores de resistencia utilizados o a la repetibilidad del circuito. La inseguridad en esto es debido a que con la ley de Ohm se pudo determinar que en la primera iteración la resistencia equivalente fue:

$$R_{eq,1} = 2,85 \Omega$$

Mientras que en la segunda iteración:

$$R_{eq,2} = 5,65 \Omega$$

Este cálculo se realiza con la fórmula (2), dividiendo el promedio de tensión en cualquier frecuencia de revoluciones entre la corriente promedio. Luego, todos los valores de resistencia fueron promediados y estos son los que se reportan anteriormente.

Sobre el comportamiento de la histéresis de la turbina, se puede comentar que dentro de las dos iteraciones, al aplicar la fórmula (3) para averiguar el cambio en la potencia generada en la bajada de las revoluciones del motor en comparación con la subida, la máxima variación fue de 2,978 % en las 1160 revoluciones de la segunda iteración. En promedio la diferencia relativa en producción de potencia fue de 0,744 % lo cual parece ser una diferencia un poco baja.

Finalmente, se analizó cuanto variaban las cuatro muestras de voltaje y de corriente que eran tomadas en cada cantidad de revoluciones por minuto. Sobre esto se encontró que los coeficientes de variación en promedio fueron:

$$CV_{V,promedio} = 0,268 \%$$

$$CV_{I,promedio} = 0,265 \%$$

Mientras que los máximos coeficientes de variación fueron:

$$CV_{V,máximo} = 0,584 \%$$

$$CV_{I,máximo} = 0,569 \%$$

Esto aparenta ser una variación muy pequeña en los datos que brindan los multímetros y los amperímetros en los tiempos de muestreo de 6 s. Ahora, por el momento resulta imposible concluir si estos valores aumentarían si se incrementa la frecuencia de muestreo y el periodo que se considera. En un futuro podría ser de conveniencia obtener o calcular un valor para la incertidumbre por estabilidad de la lectura para evitar tomar 4 datos de tensión y corriente y simplificar la toma de datos.

Finalmente, en estas pruebas se nota que la turbina no logró acercarse a su potencia nominal de 500 W (manual disponible en el apéndice 1 [1]).

Resistencia para la máxima potencia

En la siguiente tabla se presentan los datos recolectados de las pruebas para la máxima disipación de potencia.

Primera prueba						
Revoluciones (rpm)	Resistencia (Ω)	Tensión (V)	Tensión promedio (V)	Corriente (A)	Corriente promedio (A)	Potencia (W)
1000	3,9	12,76	12,79	4,191	4,200	53,704
		12,77		4,198		
		12,81		4,206		
		12,81		4,204		
1100	4,8	13,21	13,20	5,372	5,379	71,013
		13,17		5,366		
		13,16		5,364		
		13,27		5,413		
1200	5,3	15,67	15,68	5,731	5,734	89,895
		15,67		5,731		
		15,69		5,739		
		15,68		5,735		
Segunda prueba						
Revoluciones (rpm)	Resistencia (Ω)	Tensión (V)	Tensión promedio (V)	Corriente (A)	Corriente promedio (A)	Potencia (W)
1000	5,9	15,63	15,56	3,121	3,106	48,318
		15,51		3,100		
		15,56		3,103		
		15,52		3,101		
1100	4,2	12,51	13,31	5,579	5,599	74,512
		15,54		5,595		
		12,55		5,602		
		12,63		5,621		
1200	5,0	15,53	15,51	5,801	5,797	89,901
		15,56		5,814		
		15,52		5,806		
		15,42		5,768		

Tabla 1: Datos de la potencia calculada con la resistencia para la máxima disipación de potencia

En la tabla 1 se puede notar que, en las dos iteraciones, no se siguió el mismo comportamiento en el aumento o disminución de la resistencia que proveería la máxima potencia.

La primera prueba de la tabla 1 se compara con la primera iteración de los datos de potencia. Para la frecuencia de 1000 rpm y 1100 rpm se logró una mayor disipación de potencia. En los 1200 rpm se nota una reducción en la potencia, se desconoce la causa de esto.

En la segunda prueba, se logró un aumento de la potencia generada en los tres puntos muestrales de la tabla 1. Esto es el comportamiento que se esperaría cuando se ajusta la resistencia para cada punto muestral.

Recomendaciones

- Controlar que el valor de resistencia entre iteraciones de toma de datos sea el mismo.
- Aprender a utilizar el estroboscopio disponible en la UCR, no se podía identificar con facilidad la frecuencia que producía una imagen estática de la turbina. Investigar las unidades con las que trabaja el estroboscopio.

- Valorar si la magnitud de la diferencia relativa promedio entre la producción de potencia en la subida y en la bajada de las revoluciones del motor es significativa. Valorado esto, sería posible determinar si la histéresis del sistema resulta importante o no.
- Determinar si la frecuencia y periodo de muestreo de corriente y tensión afectan el coeficiente de variación en la medición de corriente y tensión. También, parece ser una buena idea evitar los muestreos múltiples y trabajar con una incertidumbre por estabilidad en mente, cuyo valor debe ser determinado ya sea del manual de los multímetros o calculado con experimentos adicionales en el sistema.
- Construcción de un pedestal para montar la turbina y evitar problemas de seguridad con la estabilidad de esta.
- Realizar una medición de la velocidad del viento con un anemómetro de hilo caliente confiable en la posición donde se coloca el eje de la turbina. Esta medición se debe realizar para todos los puntos muestrales de revoluciones por minuto de la turbina que se vayan a probar. La curva de funcionamiento del túnel se encuentra en el apéndice 2.
- Analizar el comportamiento de la resistencia de máxima potencia, aumentar la cantidad de puntos muestrales a los cuales se realizan las revoluciones e intentar estudiar el comportamiento del valor. Eventualmente se podría generar la curva de máxima potencia del sistema.

Referencias

[1] Missouri Wind And Solar, "Raptor G4 Wind Turbine Blades and Hub Kits" 21-Jun-2018.

[2] G. Richmond, "Curva de funcionamiento del túnel de viento en vacío." 24-Apr-2021.

Anexos

Anexo 1: Totalidad de los datos de las pruebas de potencia y el análisis de histéresis.

Subiendo revoluciones - primera iteración								
Velocidad del motor (rpm)	Tensión (V)	Tensión promedio (V)	Corriente (A)	Corriente promedio (A)	Potencia (W)	Coef. Variación tensión	Coef. Variación corriente	Resistencia
1000	12,03	11,99	4,468	4,464	53,520	0,305%	0,151%	2,686
	11,97		4,458					
	11,95		4,458					
	12,01		4,471					
1020	12,83	12,79	4,483	4,469	57,133	0,329%	0,377%	2,861
	12,74		4,450					
	12,81		4,483					
	12,76		4,459					
1040	13,22	13,24	4,572	4,579	60,608	0,420%	0,390%	2,891
	13,26		4,587					
	13,30		4,598					
	13,17		4,557					
1060	13,64	13,61	4,719	4,708	64,064	0,277%	0,261%	2,890
	13,58		4,695					
	13,57		4,700					
	13,64		4,718					
1080	13,90	13,94	4,835	4,847	67,536	0,391%	0,396%	2,875
	14,01		4,875					
	13,89		4,835					
	13,94		4,841					
1100	14,26	14,25	4,973	4,965	70,732	0,289%	0,328%	2,870
	14,30		4,983					
	14,21		4,948					
	14,22		4,954					
1120	14,65	14,58	5,107	5,084	74,117	0,341%	0,319%	2,868
	14,58		5,080					
	14,54		5,070					
	14,55		5,077					
1140	15,00	15,00	5,228	5,230	78,443	0,163%	0,193%	2,868
	15,03		5,235					
	14,97		5,216					
	15,00		5,239					
1160	15,40	15,41	5,372	5,377	82,852	0,295%	0,261%	2,866
	15,45		5,391					
	15,44		5,384					
	15,35		5,359					
1180	15,69	15,71	5,469	5,478	86,038	0,109%	0,106%	2,868
	15,73		5,482					
	15,70		5,479					
	15,71		5,480					
1200	16,11	16,08	5,620	5,611	90,197	0,271%	0,252%	2,865
	16,06		5,605					
	16,02		5,594					
	16,11		5,625					

Bajando revoluciones - primera iteración								
Velocidad del motor (rpm)	Tensión (V)	Tensión promedio (V)	Corriente (A)	Corriente promedio (A)	Potencia (W)	Coef. Variación tensión	Coef. Variación corriente	Resistencia
1000	12,41	12,41	4,344	4,346	53,906	0,387%	0,375%	2,855
	12,47		4,369					
	12,36		4,335					
	12,38		4,334					
1020	12,67	12,70	4,463	4,467	56,709	0,164%	0,138%	2,842
	12,69		4,463					
	12,72		4,476					
	12,70		4,466					
1040	12,96	13,03	4,564	4,588	59,767	0,383%	0,392%	2,840
	13,02		4,584					
	13,06		4,599					
	13,07		4,604					
1060	13,50	13,42	4,753	4,720	63,342	0,417%	0,482%	2,843
	13,37		4,704					
	13,40		4,706					
	13,41		4,717					
1080	13,87	13,80	4,881	4,853	66,947	0,421%	0,435%	2,843
	13,73		4,831					
	13,78		4,845					
	13,80		4,855					
1100	14,16	14,20	4,980	4,989	70,815	0,260%	0,208%	2,845
	14,24		5,002					
	14,17		4,981					
	14,21		4,992					
1120	14,57	14,57	5,116	5,117	74,571	0,197%	0,170%	2,848
	14,61		5,129					
	14,57		5,116					
	14,54		5,108					
1140	14,86	14,97	5,222	5,258	78,705	0,580%	0,546%	2,847
	14,99		5,265					
	15,07		5,291					
	14,96		5,252					
1160	15,36	15,36	5,385	5,387	82,754	0,154%	0,151%	2,852
	15,33		5,376					
	15,38		5,394					
	15,38		5,392					
1180	15,75	15,76	5,524	5,523	87,025	0,095%	0,083%	2,853
	15,74		5,516					
	15,77		5,526					
	15,77		5,525					
1200	16,01	16,12	5,601	5,638	90,885	0,584%	0,569%	2,859
	16,11		5,632					
	16,24		5,679					
	16,12		5,640					

Subiendo revoluciones - segunda iteración								
Velocidad del motor (rpm)	Tensión (V)	Tensión promedio (V)	Corriente (A)	Corriente promedio (A)	Potencia (W)	Coef. Variación tensión	Coef. Variación corriente	Resistencia
1000	16,09	16,17	2,851	2,859	46,233	0,386%	0,262%	5,657
	16,16		2,854					
	16,21		2,863					
	16,23		2,867					
1020	16,66	16,63	2,943	2,939	48,887	0,158%	0,140%	5,659
	16,65		2,942					
	16,61		2,934					
	16,61		2,938					
1040	17,06	17,05	3,015	3,013	51,379	0,175%	0,248%	5,660
	17,06		3,013					
	17,01		3,003					
	17,08		3,021					
1060	17,56	17,54	3,102	3,101	54,383	0,251%	0,244%	5,657
	17,59		3,110					
	17,52		3,098					
	17,49		3,092					
1080	17,92	18,00	3,167	3,181	57,258	0,471%	0,450%	5,659
	17,94		3,171					
	18,10		3,197					
	18,04		3,189					
1100	18,50	18,45	3,270	3,262	60,171	0,205%	0,174%	5,656
	18,41		3,257					
	18,44		3,260					
	18,44		3,260					
1120	18,90	18,93	3,342	3,351	63,433	0,132%	0,207%	5,651
	18,94		3,350					
	18,96		3,359					
	18,93		3,351					
1140	19,38	19,37	3,438	3,431	66,462	0,338%	0,278%	5,647
	19,37		3,427					
	19,45		3,439					
	19,29		3,419					
1160	19,84	19,82	3,511	3,508	69,529	0,180%	0,236%	5,650
	19,77		3,496					
	19,82		3,510					
	19,85		3,515					
1180	20,14	20,18	3,566	3,573	72,108	0,134%	0,140%	5,648
	20,19		3,574					
	20,19		3,576					
	20,20		3,577					
1200	20,73	20,68	3,671	3,662	75,716	0,248%	0,230%	5,647
	20,71		3,666					
	20,62		3,652					
	20,65		3,658					

Bajando revoluciones - segunda iteración								
Velocidad del motor (rpm)	Tensión (V)	Tensión promedio (V)	Corriente (A)	Corriente promedio (A)	Potencia (W)	Coef. Variación tensión	Coef. Variación corriente	Resistencia
1000	16,16	16,19	2,862	2,868	46,437	0,159%	0,185%	5,645
	16,22		2,874					
	16,18		2,866					
	16,20		2,871					
1020	16,47	16,52	2,920	2,930	48,403	0,218%	0,227%	5,640
	16,54		2,933					
	16,53		2,930					
	16,55		2,935					
1040	16,99	17,02	3,012	3,017	51,333	0,175%	0,154%	5,641
	17,01		3,015					
	17,06		3,023					
	17,01		3,016					
1060	17,50	17,56	3,102	3,113	54,649	0,296%	0,317%	5,639
	17,57		3,118					
	17,62		3,124					
	17,53		3,108					
1080	17,92	17,99	3,177	3,187	57,342	0,372%	0,228%	5,646
	18,08		3,194					
	17,97		3,187					
	18,00		3,190					
1100	18,49	18,45	3,289	3,274	60,396	0,221%	0,348%	5,636
	18,42		3,266					
	18,48		3,275					
	18,41		3,264					
1120	18,97	18,94	3,363	3,357	63,555	0,133%	0,147%	5,641
	18,93		3,356					
	18,93		3,356					
	18,91		3,351					
1140	19,31	19,33	3,421	3,427	66,249	0,127%	0,221%	5,640
	19,34		3,427					
	19,31		3,423					
	19,36		3,438					
1160	19,71	19,71	3,493	3,494	68,862	0,252%	0,244%	5,642
	19,78		3,506					
	19,68		3,489					
	19,67		3,487					
1180	20,28	20,32	3,594	3,601	73,149	0,203%	0,194%	5,642
	20,28		3,596					
	20,34		3,604					
	20,36		3,609					
1200	20,74	20,78	3,674	3,683	76,518	0,138%	0,179%	5,642
	20,78		3,683					
	20,78		3,684					
	20,81		3,690					

Apéndices

Missouri Wind and Solar

Wind Turbine Manual

Introduction

1. Thank you for purchasing a Missouri Wind and Solar wind turbine system. Please be sure to fully read and understand these instructions before installation.
2. Freedom turbines are available in 1600 watt and 2000 watt models in the following voltages: 12V, 24V, 48V. Ensure you have the right turbine by looking on the electrical wiring (“pigtail”) of the turbine for a colored dot: green dot = 12V; no dot/“black” = 24V; grey dot = 48V.
3. DANGER! Turbines output lethal voltage and current levels. Exercise safety precautions.

Tower Considerations

1. An ideal tower is one that allows easy access to the turbine for inspection and periodic maintenance. Common tower designs include a hinge plate at the bottom, which allows the tower to be laid down on the ground. If you choose to use a steel pipe, we recommend several runs of guyed wire to secure the tower.
2. Ensure the tower is 30 feet higher than the nearest obstruction (trees, buildings) in a 100’ radius. Doubling the tower height increases power output by 34% or more. Lower heights may produce less power. This is a function of naturally occurring winds, not the turbine’s performance. However, lower towers may make more sense cost-wise.
3. For towers 60 feet in height, use a minimum of 3/16 inch guy wire cable to support the top of the pole and 1/8 inch to support the middle and/or bottom. 7x7 cable – 7 bundles, made up of 7 individual wires each, twisted together into one rope - is recommended.
4. Wind turbulence will severely reduce power output and is usually caused by structures interrupting and/or blocking clean wind from contacting the blades and tail assembly. This is evident by erratic left-to-right pivoting of the turbine, sometimes with heavy vibrations.
5. Placing your turbine in a low wind area, or a bad location such as a rooftop or behind a building, may still produce power, but at a much lower charging rate. Turbines mounted on rooftops or connected to the end of a building will see considerably less output due to turbulent or “dirty” wind. The higher the better!
6. It is recommended to drive a ground stake at the base of the tower and clamp a 4 gauge wire from the stake to the tower pole. Grounding a battery system is typically done between only the battery negative terminal and a ground stake.

Use 4 gauge wire for the ground. Try not to have sharp bends in the ground wires as lightning can jump out of sharp bends. This is minimal information. Please refer to additional sources for further grounding information.

Blade and Hub Assembly

1. Raptor Generation 4 & 5 blades have a flat face near the blade tip. The flat surface must face the wind. Correctly installed Gen 4 blades will reveal the word “Raptor” on the blade base (see Figure 1). Correctly installed Gen 5 blades will have a notch on the blade base situated on the right side (see Figure 2).



Figure 1

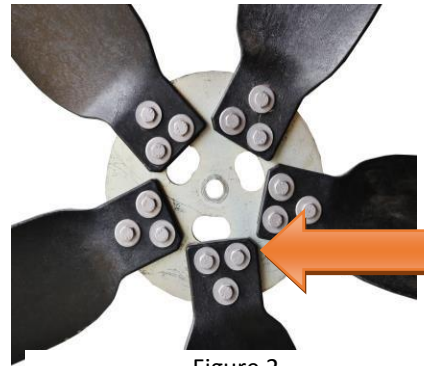


Figure 2

2. The blade bolts are designed to fit tightly. You can re-drill the blade mounting holes using a 1/4” drill bit, if needed. If the holes are grossly off-centered, then seek a replacement before installation.
3. Use the provided self-locking nuts, and ensure the nut is seated completely against the hub (see Figure 3). Torque the blade bolt/nuts to the specifications in the list below after nut is fully seated. Do not overtighten the nuts, as the blades may crack. Failure to adhere to this warning could result in blades coming loose during operation, and possibly causing injury, damage, or death.
 - **Raptor Generation 4 (G4) Blades:** 7 ftlbs
 - **Raptor Generation 5 (G5) Blades:** 10 ftlbs
 - **Falcon Blades:** 15 ftlbs

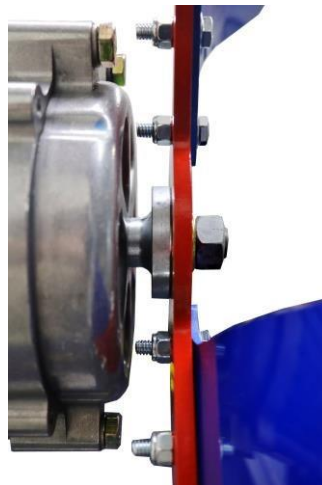


Figure 3

4. The blades are semi-flexible and may be slightly bent forward, backward, or out of line. The blade will self-straighten over time and remain straight permanently.
5. These blades turn very fast and can cause severe bodily harm. Never place a wind turbine near power lines or structures. Moving structures such as trees sway and grow and can come in contact with the blades, causing damage or loosening or separation of the blades from the hub. Place blades high

enough out of reach of children or inexperienced people. Missouri Wind and Solar, LLC assumes no liability for injury or damage caused by these blades.

6. Inspect your blades and hub mounting fasteners annually for damage, corrosion, and tightness, especially in humid or salty environments. Our blades require no initial or follow-up surface coating. Do not paint the blades; UV protectant protects the blades.
7. Please allow approx. 100 hours of bearing “break in” time. Until then, turbine start up may be slow.

Turbine Wiring

1. The Permanent Magnet Generator (PMG) outputs 3-phase wild AC power. The PMG’s internal wiring connects to a 3-wire bundle (wire size depends on PMG amps and distance between PMG and bridge rectifier), which travels down the tower to the turbine brake, then to the bridge rectifier. The rectifier converts 3-phase wild AC to DC, and its DC output is sent to the divert (charge) controller, then on to the batteries.

NOTE: The PMG’s AC output is 3 hot wires. The PMG cannot be wired directly into a standard household fuse box/service panel with power supplied by the electrical grid or generator. Doing so can result in electrical shock, fire, even death. The PMG must be connected to an AC-to-DC rectifier.

2. Do not use solid wire or undersized wire in any leg of your turbine installation. Solid wire will not twist and flex. Undersized wire acts as a resistor, decreasing current flow and allowing heat build-up, both of which will reduce the turbine’s power output and cause turbine failure. Proper wire selection is based on amps and distance (refer to DC wiring chart). Wire larger than recommended is acceptable. Use appropriate electrical connectors and heat shrink. Make clean and tight electrical connections. Moderately tug at your connections to check for loose fittings.

Turbine Accessory Assembly

Turbine Brake Switch

1. The brake is an optional component in a turbine system, but important in that it secures the blades from turning when raising/lowering the tower.
2. The brake is the first component to receive the 3-phase AC output of the turbine. Usually mounted near the bridge rectifier and divert controller, to minimize length of DC cabling.
3. The brake switch has 3 black wires and 3 red wires. Connect black wires to the turbine’s AC output; connect the red wires to the bridge rectifier. Keep switch in either the “run” or “brake” position, never let the turbine free spin. The only exception is if the fuse or breaker blows. It is better to allow a free spin than to burn out the generator head.

NOTE: Avoid braking your turbine in winds greater than 20 MPH. Braking in these conditions can cause the turbine stator to overheat and burn up. The brake is normally used during maintenance and turbine/tower erection or takedown. Never allow the turbine to free-spin in high winds, as the blades can self-destruct and open turbine voltages can be lethal and damaging to the turbine at high RPMs. It is best to leave the brake in the “On” position and let the divert controller and diversion load regulate the turbine.

Bridge Rectifier (Figures 6 & 7)

Refer to the included rectifier instruction sheet for more detailed information.

1. The rectifier will get warm during normal operation, so it is mandatory to mount the rectifier onto a metal surface for heat dissipation. Aluminum makes the best heat sink, the larger the better.



Figure 6 – 90A for 12 & 24V PMGs



Figure 7 – 50A for 48V PMGs

2. The rectifier is normally mounted below the brake switch, so the 3 red wires from the brake have a straight run to the rectifier. **Make sure the rectifier positive and negative terminals are connected correctly by looking for the + and - symbols. Do not reverse the connections.**
3. Use 3/8" female spade terminals for the AC wires, or terminal lugs with a #8 screw for 90 amp rectifier or #5 screw for 50 amp rectifiers to attach to the rectifier's metal tabs. A mechanical joint that is also soldered will last a long time and provide superior electrical conductivity. If you do not solder the connection, we recommend dielectric grease.
*Do not overheat the rectifier during soldering, allow no more two seconds per terminal maximum.
4. Inspect all connections on the bridge rectifier and ensure they are not coming in contact with the rectifier housing which is conductive aluminum. This will cause serious issues and possible burn up.
5. Always place an inline fuse or breaker directly after the rectifier on the positive DC side.

Freedom II fuse sizes: 12V – 120A; 24V – 80A; 48V – 40A

Freedom I fuse sizes: 12V – 100A; 24V – 60A; 48V – 30A

NOTE: All electrical components may become warm or even hot. Do not install directly on or around flammable material, such as foam insulation boards or near stored gasoline cans or other flammable liquids. Installations should be out of reach of children and pets.

*Allow 10 inches of space around components, especially a dump load.

Diversion (Dump) Load

1. Normally mounted adjacent to the divert controller.
2. Install the divert load as per its instructions, unless it conflicts with another set of instructions such as your charge controller instructions. Keep in mind, your diversion load relay is limited to 120 amps maximum.

NOTE: Diversion load resistors can get VERY HOT and dissipate excessive heat, especially during high winds when continuous dumping of energy can occur. NEVER place anything flammable near the dump load. Remove all packing material from the unit and always mount resistors on a fire-proof surface.

Divert Controller ("Charge Controller")

1. Mount divert controller out of the weather, near the battery bank.
2. Allow room adjacent to the divert controller to mount the diversion load. Space adjacent components several inches from the divert controller or install a heat proof barrier.

Wiring

1. Proper wire size is critical for system operation and safety. [Use our DC wire chart](#) to select the correct wire size for your installation.

NOTE: 66A also represents the maximum circuit breaker/fuse protection required. For systems required to comply with the National Electrical Code, multiply 66A by 1.56. [See the Midnite Solar DC breakers at www.midnite-solar.com/breakers](http://www.midnite-solar.com/breakers) for 0-150V DC systems.

- a. Assuming the total distance between the first DC component (bridge rectifier) and the last DC component (battery bank) is less than 15 feet, then #4 AWG DC wire is sufficient. DC wiring will be used between the following components:
 - 1) Rectifier to divert controller
 - 2) Divert controller to diversion load
 - 3) Divert controller to battery bank

Turbine Assembly

1. Tail Assembly (Figures 10 & 11)

- a. Attach left and right tail arms (Figure 10).
NOTE: For dual-arm tail, ensure tabs face inward.
 - b. Attach clamp connector to L-bracket.
 - c. Attach L-bracket to PMG mount.
NOTE: L-bracket should NOT touch top of tower pole (1 1/2" steel pipe).
- a. Attach tail fin. **Secure all bolts to a torque of 15 ftlbs.**

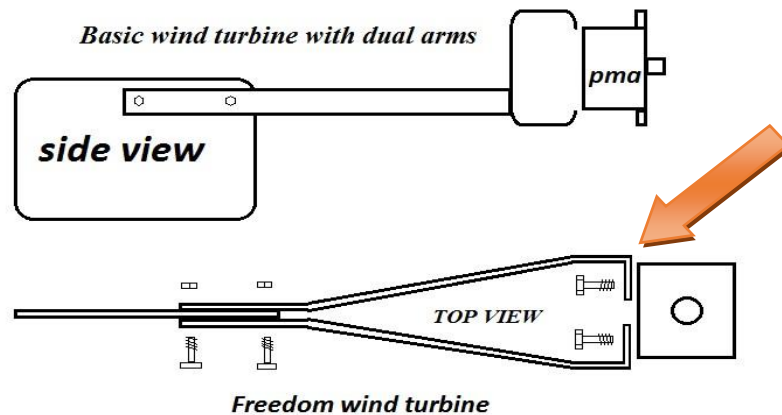


Figure 10

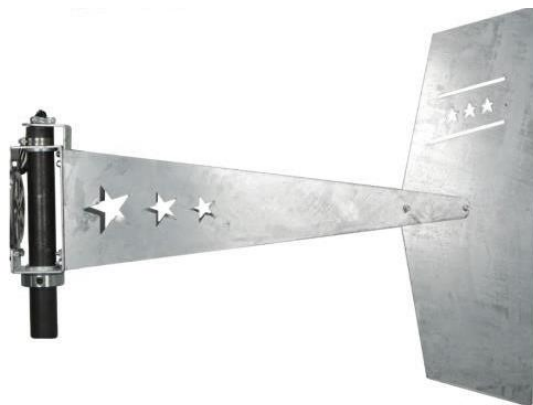


Figure 11

2. Pole Prep

- a. If your wind turbine includes a lock collar, slide collar over steel pipe (see Figure 12). Secure two set screws, do not overtighten. Doing so may cause the pole to lose its round shape.

NOTE: Position lock collar so L-bracket on mount assembly does not touch pipe. See Figure 13.

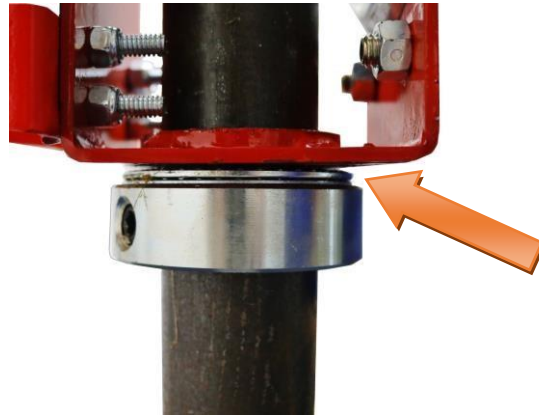


Figure 12

- b. If supplied, place nylon washer or optional yaw bearing on top of lock collar (Figure 12).

NOTE: Your tower must be level and plumb, especially when using the yaw bearing.

- c. Slide mount and tail assembly onto pipe, resting on top of nylon washer/yaw bearing. **Do not use a lock collar at the top of your pole.** Doing so may cause the pole to be out of round and prevent the turbine from pivoting freely. Use the supplied hose clamp instead. **WIND TURBINES INCLUDE ONE LOCKING COLLAR ONLY!**



Figure 13

3. Turbine / Permanent Magnet Generator (PMG)

- a. Attach PMG to mount with 4 bolts. **Tighten bolts to a torque of 20 ftlbs.** Figure 14 is an illustrated parts breakdown drawing of our DC PMA, which reflects 2 bolts for mounting versus 4. Otherwise, all other components assemble similarly.

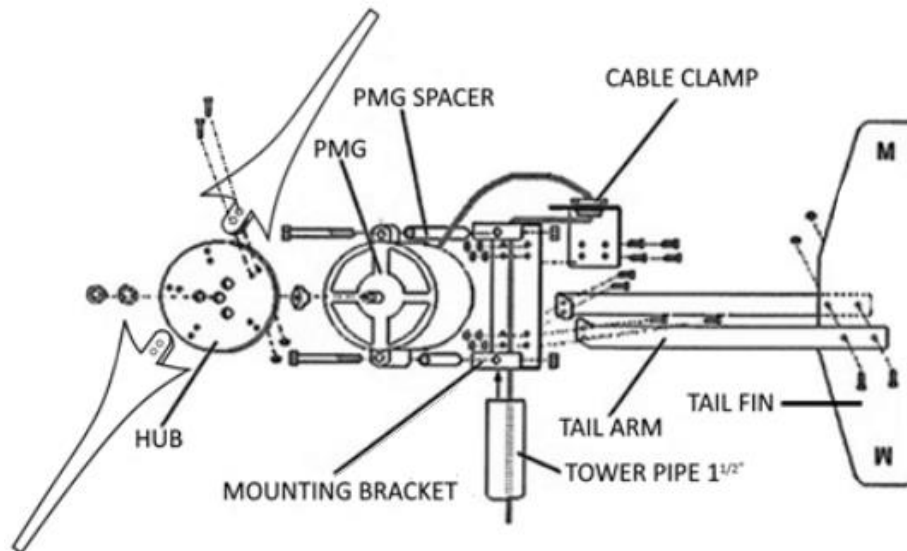


Figure 14

4. Blades and Hub

- a. Remove nut and lock washer from PMG rotor shaft. Ensure hub spacer, as seen in Figure 3, remains in place. Remove the three bolts from the spacer/stabilizer.
- b. Place hub on rotor shaft, aligning the slot for the key. Reinstall three bolts through the hub into the stabilizer. Reinstall lock washer and nut, tighten using wrench and Allen wrench, as seen in Figure 15. **Tighten to a torque of 60 ftlbs.**



Figure 15

NOTE: Extreme overtightening is not necessary because the rotation of the hub and blades helps keep the nut tight. The keyed shaft and bolts holding the hub to the spacer keep the blades secure to the PMG.

NOTE: Set brake switch set to “Brake” or leave turbine/tower on the ground before installing hub/blade assembly. DO NOT install the turbine onto the tower during windy conditions. Ensure the blades are stationary (not rotating) before connecting the battery bank to the divert controller. This can be accomplished by either using the brake switch or installing the hub and blade assembly AFTER making the electrical connections.

Operation

1. Assuming the tower is erected and level, the turbine is installed, and all electrical connections are made, toggle the brake switch to the “On” position. *Make sure to always connect charge controllers to your batteries before connecting the wind turbine.*
2. Monitor battery bank voltage as displayed on the divert controller. Ensure it reads close to the bank voltage. For example, if you planned to have a 24V bank and the divert controller reads 11.7V, then something is wrong.
3. If you have an ammeter, watch for current flow when the turbine blades spin.
4. It is a good idea to watch/listen (solenoid clicks audibly) to the divert controller during high winds or when the battery bank is nearly full to ensure the divert controller “dumps” at the preset voltage level. For a 12V bank, dump occurs at 14.4V-13.6V.

Troubleshooting Guide

NOTE: Before you call or e-mail, PLEASE read and understand all the PMG and associated components’ instructions. PLEASE read the entire troubleshooting section. PLEASE have a list with all the products’ model numbers (i.e., purchase invoice) when you call for help. It is easier and quicker for us to troubleshoot your issues if you e-mail us pictures of your entire system, from the PMG to the inverter, and everything in between.

1. Wind turbine output voltage varies based on wind speed, battery bank voltage, and blade count (torque). We advise measuring volts and current on the DC side of the bridge rectifier using DC meters, versus measuring on the AC side. Only check the DC output at the rectifier when the turbine is disconnected from the charge controller and during no high-wind conditions.

NOTE: Disconnecting turbine from battery bank during high winds may allow turbine to free-spin wildly, which can damage the turbine and/or blades.

2. The turbine will only charge a battery when the turbine output exceeds the battery bank voltage. It is possible to see your battery voltage rise quickly with a strong wind gust, then fall back to the original voltage level, or slightly above that level.
3. Mismatched batteries: Using old batteries with new, large batteries with small, or a mismatched battery bank of any kind is not optimal and will result in an undercharged battery bank. In this case, lack of charging is not a fault of the wind turbine. Additionally, the batteries will not last very long in most cases.
4. To determine the amount of power being produced by your turbine at any one moment, multiply the battery bank voltage by the turbine’s current output to determine watts produced. Some divert controllers have a built-in ammeter; otherwise, use a shunt with ammeter inline on the DC positive wire between the rectifier and the divert controller.
5. A slight hum from the turbine is normal.
6. If the turbine severely shakes or vibrates, this is usually caused by one or more unbalanced blades or a blade(s) installed backwards. If you have a bent blade that will not straighten itself over time, heat the

blade using a heat gun or hair dryer until it is extremely warm, but not melting. While the blade is hot, put a weight on the middle of the bend and let the blade completely cool. All Raptor blades have a twist from the butt to the tip, and this is normal. Bent blades, however, rarely create problems with turbine operation.

7. When the voltage of your battery bank rises, it takes more wind (torque) to continue charging the bank. Our wind divert controllers are programmed to prevent overcharging the battery bank. Battery bank and divert voltages:
 - 12V Bank: 50% - 12.3V; 100% - 12.8V; Divert – 14.4V
 - 24V Bank: 50% - 24.6V; 100% - 25.6V; Divert – 28.8V
 - 48V Bank: 50% - 49.2V; 100% - 51.2V; Divert – 57.6V
8. When a turbine outputs power, it creates heat. Sustained operation in high winds can cause heat build-up and power loss, until the wind slows and the turbine cools down.
9. Check the wire, especially near connection points, and note how hot it is. If it is hot to the touch, then you are using more amperage than the wire can handle. You will need to add more copper by doubling up the wire or replacing it with larger cable.
10. A poor, sloppy, dirty, or loose connection typically causes heat buildup especially near the connection point and will also result in significant power loss.

Troubleshooting common problems:

a. Turbine does not charge battery bank:

- 1) Verify the PMG's voltage matches the battery bank voltage (i.e. 12V PMG and 12V battery).
- 2) Ensure wire size is correct between all DC components, all electrical connections are correct and tightly connected, crimped, or soldered.
- 3) Ensure DC positive and negative from turbine (via divert controller and/or rectifier, depending on divert controller) are connected to the "Master Positive" and "Master Negative" battery bank terminals. See Figure 16.

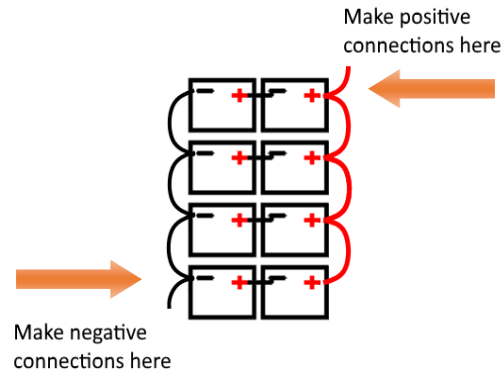


Figure 16

- 4) Ensure wind speed is sufficient to produce power, usually 6 MPH or greater.
- 5) If starting out with a fully charged battery bank, sometimes it helps to place a load on the bank, draw down the voltage, then check for turbine power production.
- 6) Use DC ammeter (or shunt with gauge) to check for current off any DC positive wire between rectifier and battery bank. Amount of current depends on wind speed. With turbine spinning and no current, check electrical connections.
- 7) When your battery voltage rises it takes more wind to charge. A full battery bank at rest is 12.6V, 25.2V, etc. A charge controller will stop charging at 14.4v, 28.8v to keep batteries from being ruined.
- 8) When a wind turbine outputs power it creates heat, which can build up. Open faced PMA/PMG wind turbines work best to keep themselves cool. Too much sustained output can cause heat buildup and power production to decrease until the wind slows for some time.
- 9) There may be an open circuit (poor or no connection) on one of the phases from the wind turbine. Check connections between the stator, jack, connection to wire, connection from wire to brake switch (if applicable), brake switch internal contacts, brake switch to rectifier, rectifier internals, and so on down to the batteries. It is easiest to begin checking connections at the lowest point and work upward.
- 10) Please make sure your rectifier positive and negative connections are correct. Note the actual + and - symbols and make sure they connect to the charge controller accordingly.

Wind Turbine Wattage & Voltage	Dump Load Size
1600W in 12V	600W – 1200W
1600W in 24V	600W – 1500W
1600W in 48V	600W – 1500W
2000W in 12V	1200W - 1500W
2000W in 24V	1200W – 1500W
2000W in 48V	1200W – 1500W

NOTE: When the divert controller dumps, the battery bank is discharging energy to the diversion load (resistors). Divert controllers will measure battery voltage levels every 5 seconds, on average. When the battery voltage drops below the dump set point, the divert controller stops the dump. During the dump, the PMG current is also sent to the dump load, but the function is primarily to drain the battery bank's excess voltage. Therefore, an undersized diversion load takes much longer for the battery bank to lower its voltage level, thus the divert controller operates longer and gets hot.

NOTE: Use maximum dump load figures above when using an approved MPPT charge controller, if you experience regular high winds, or have AGM or gel batteries or your batteries may overcharge.

c. Blades not spinning or seem unbalanced

NOTE: Check the ohms at the rectifier ONLY in a no-wind condition.

Ensure your test meter has a fully charged battery or it will read incorrectly. ONLY check the ohms (Ω) when the turbine is not spinning or even slightly rocking back and forth and the DC side of the rectifier is disconnected.

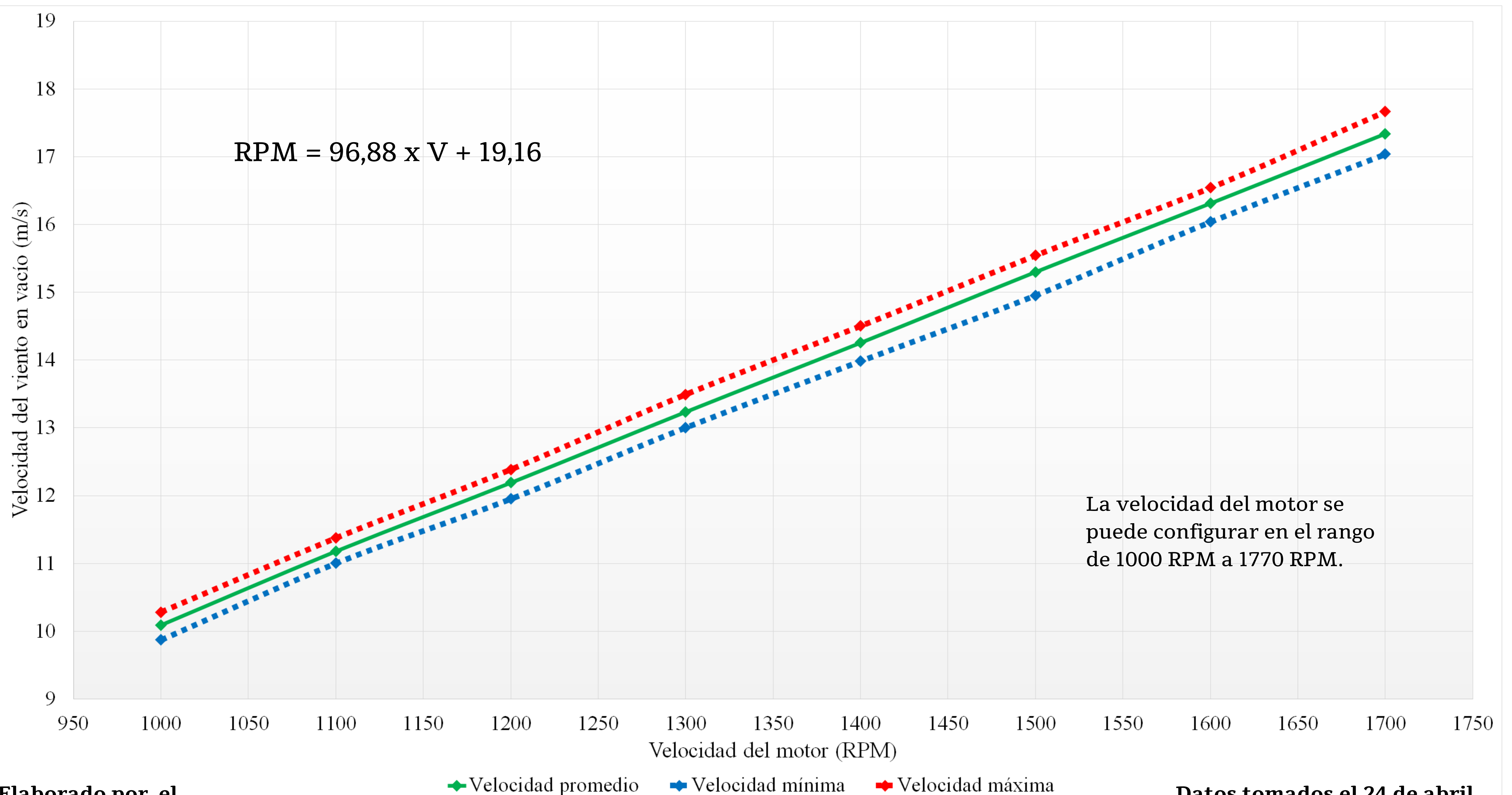
If the bridge rectifier is warm or hot when the turbine has been idle for an extended period, then the rectifier either is defective or has the wrong polarity connected on the DC side.

You may need to check the ohms (Ω) of the 3 separate phases. You can do this at the 3 phase side of the rectifier with your total length of power cord connected to the wind turbine.

The ohms of the 3 PMG's Stators:

- 12v is 0.3 ohm phase to phase, 24v is 1.8 ohm, 48v is 6.7 ohm.
 - You would check the ohms between the 3 phases on the AC side phase 1+2, 1+3, 2+3.
- 1) Make sure no wire's copper is touching another. Check the ohms/resistance between phase 1 + 2; 1 + 3; 2 + 3. If all read the same, for example 2 ohms each, then there is no short between phases either in the rectifier, power cord, or copper windings (stator inside turbine motor (PMA/PMG).
 - 2) If you read 20 ohms, 0 ohms, 2 ohms this means you have a phase shorted against another. Shorts will cause havoc on your system and typically a failure (charring, burning) of the stator in the turbine motor. It's like holding the brake pedal and accelerator down on your car at the same time! If you have other 3 phase devices connected before or after the rectifier, check them for shorts as well.
 - 3) Ensure your bridge rectifiers are not wired in series (typically for a Freedom II or dual motor wind turbine). If in series, your turbine motor will produce double the voltage and you will get lower amperage and a noticeably lower speed of rotation from the blades. Optimally, you will wire your rectifiers in parallel and see an increase in power and rotation speed.
 - 4) The sealed bearings may take approximately 100 hours to fully break in and loosen up. Before this break in period, the wind turbine might spin more slowly, especially in very low wind, and hamper startup speed slightly.

Curva de funcionamiento del túnel de viento en vacío



Elaborado por el
Laboratorio de
Investigación en
Energía Eólica (LIENE):
grichmond@tec.ac.cr



Datos de placa	Valor
Potencia Nominal	40 hp
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	230 V / 460 V
Corriente	92.6 A / 46.3 A
Velocidad	1770 RPM
Factor de Servicio	1.15
Fases	3

Velocidad del motor (RPM)	Velocidad (m/s)		
	Mínima	Promedio	Máxima
1000	9.87	10.09	10.28
1100	11.00	11.18	11.38
1200	11.95	12.19	12.39
1300	13.01	13.23	13.49
1400	13.99	14.25	14.50
1500	14.96	15.30	15.54
1600	16.04	16.31	16.54
1700	17.04	17.34	17.66

Datos tomados el 24 de abril del 2021

Condiciones ambientales durante la toma de datos	
Presión	87913 Pa
Temperatura	23.6 °C
Humedad	67.7%

