



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN, DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

TEMA: ANÁLISIS AERODINÁMICO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA Y CONDICIONES DE OPERACIÓN MEDIANTE DINÁMICA COMPUTACIONAL ENTRE UN AEROGENERADOR TIPO RAPTOR G5 Y UN AEROGENERADOR TIPO MACH 5 MULTIPALA DE BAJAS VELOCIDADES DE VIENTO

AUTORA: ISAMAR AÍDA MORALES TRUJILLO

AGOSTO, 2018





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis aerodinámico mediante dinámica computacional entre un aerogenerador tipo Raptor G5 y un aerogenerador tipo Mach 5 multipala de bajas velocidades de viento para determinar la eficiencia y condiciones de operación.





OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la implementación de los aerogeneradores multipala de bajas velocidades de viento tipo Mach 5 y tipo Raptor G5.
- Utilizar técnicas de dinámica computacional de fluidos, los diferentes modelos para la simulación de fluidos y los métodos de mallado.
- Determinar la eficiencia de cada uno de los aerogeneradores, así como las condiciones de operación.
- Comparar los resultados obtenidos para determinar cuál es el aerogenerador más eficiente.





HIPÓTESIS

- Con el análisis aerodinámico de los aerogeneradores multipala de baja velocidad tipo Mach 5 y Raptor G5, se podrá determinar la eficiencia de cada uno de ellos así como las condiciones de operación a las que estarán sometidos.





VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

- **VARIABLE INDEPENDIENTE:** Análisis aerodinámico de los aerogeneradores multipala de baja velocidad de viento Mach 5 y Raptor G5.
- **VARIABLE DEPENDIENTE:** Determinar las condiciones de operación y eficiencia de cada aerogenerador.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA





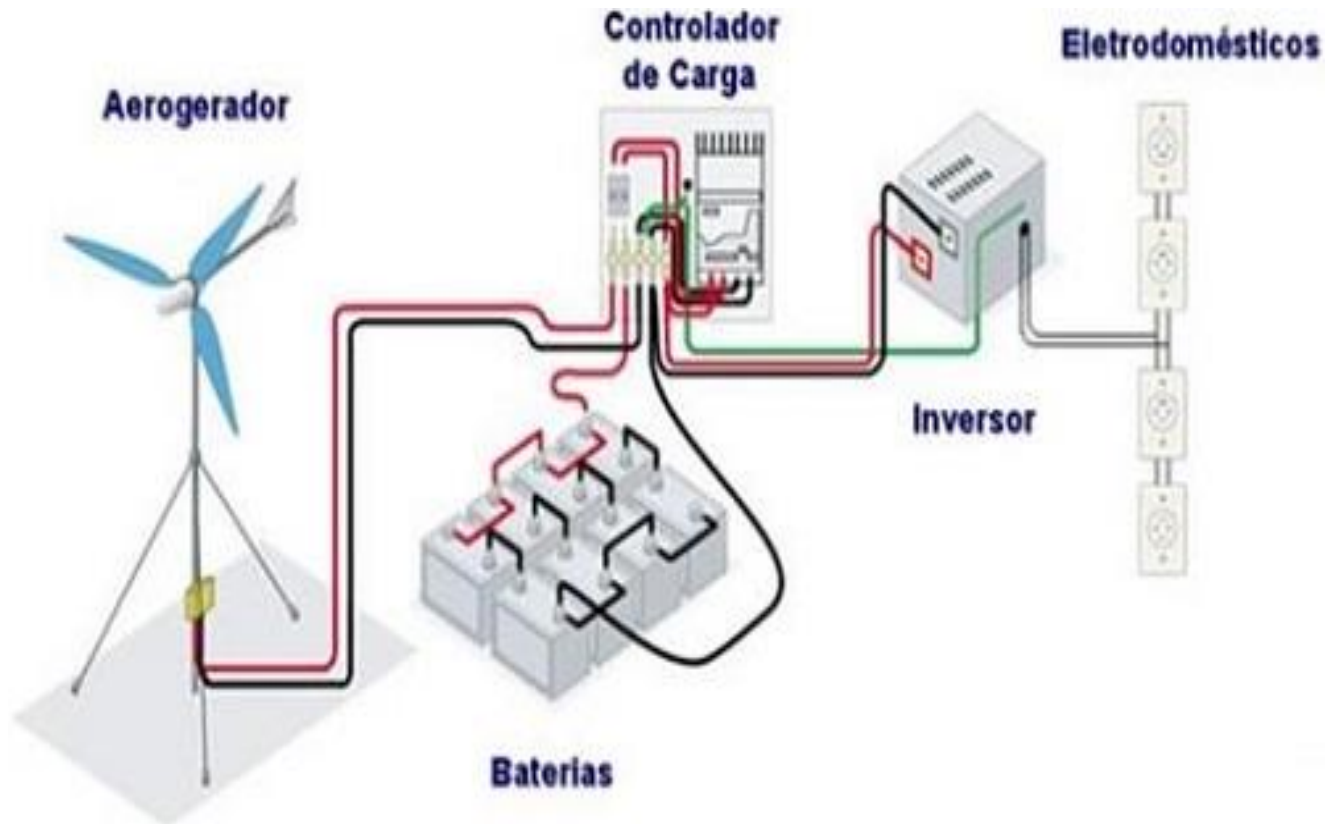
ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es la energía que se obtiene del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire.





INSTALACIÓN CENTRAL EÓLICA





COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR



El rotor

Es el elemento que transforma la energía del viento en energía mecánica. El rotor está compuesto por las palas, el eje y el buje.

Palas

Son las que reciben la fuerza del viento y se mueven gracias a su diseño aerodinámico.





AEROGENERADORES SEGÚN EL NÚMERO DE PALAS



MONOPALA
(Una Pala)



TRIPALA
(Tres palas)



BIPALA
(Dos Palas)



MULTIPALA
(Mas de tres palas)





RAPTOR G5



MACH 5



	RAPTOR	MACH
Diámetro	1.5494 m	1,5748 m
# Palas	5	5
Forma	Cónica	Ala de gaviota





CONCEPTOS BÁSICOS

- **Velocidad relativa**

Es la velocidad del viento que incide sobre la pala.

- **Ángulo de ataque**

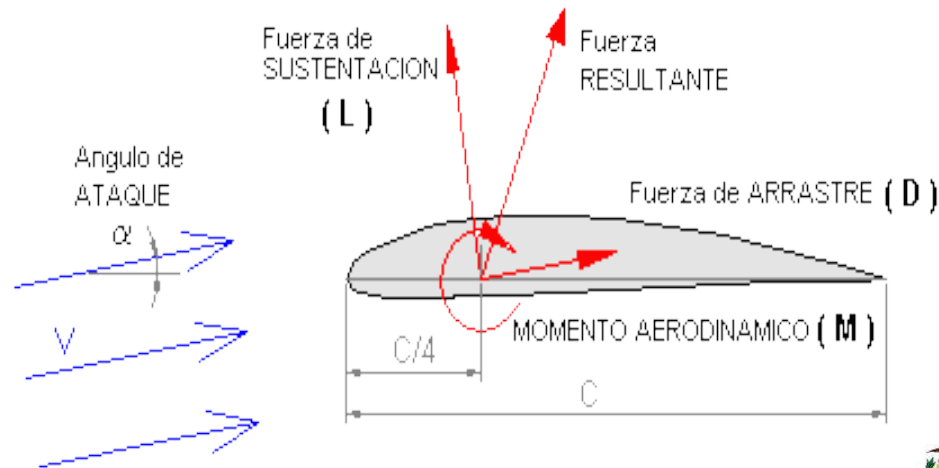
Es el ángulo que se forma entre la dirección de la velocidad relativa del viento y la de la cuerda de la pala.

- **Fuerza de arrastre (FD)**

Es la fuerza en dirección del movimiento del fluido

- **Fuerza de sustentación (FL)**

Es la fuerza en dirección perpendicular a la fuerza de arrastre.





EFICIENCIA AERODINÁMICA

Se define la eficiencia aerodinámica como el cociente C_L/C_D o F_L/F_D y mide la capacidad de proporcionar sustentación frente a la resistencia asociada. Se llegan a obtener valores superiores a 150 en casos ideales, siendo más prácticos valores inferiores a 100

$$E_A = \frac{C_L}{C_D} = \frac{F_L}{F_D}$$





POTENCIA EÓLICA

Para determinar la potencia del viento se utiliza la ecuación, en donde actúa la densidad del viento por el área de barrido de las palas del aerogenerador y esto por la velocidad del viento de la zona al cubo.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

El límite de Betz indica que la proporción máxima de energía que se puede extraer del viento utilizando un aerogenerador es de 0.59. La potencia se ve entonces afectada por el coeficiente de potencia C_p donde $0 \leq C_p \leq 0.59$, a mayor eficiencia aerodinámica del sistema generador, más alto será el valor de C_p .

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{aire}} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$$





TIPOS DE FLUIDO

Se considera flujo laminar a valores de Reynolds por debajo de 2000 y flujo turbulento por encima de 3000.

Para determinar el número de Reynolds se utiliza la ecuación:

$$Re = \frac{\rho * v * lc}{\mu}$$

Donde lc es la longitud característica del cuerpo , μ es la viscosidad dinámica, ρ la densidad y v la velocidad.

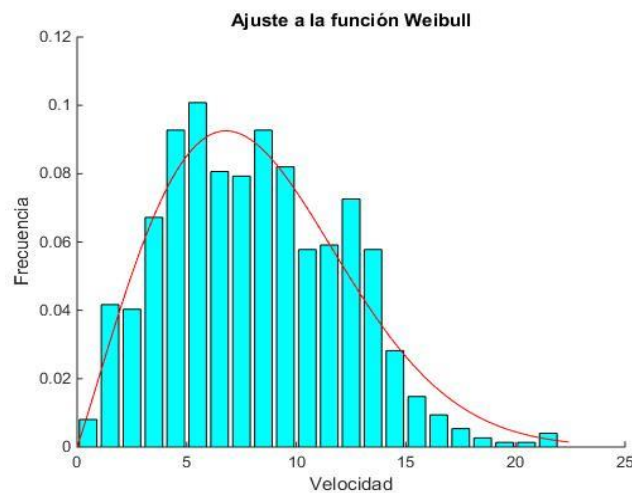




MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL VIENTO

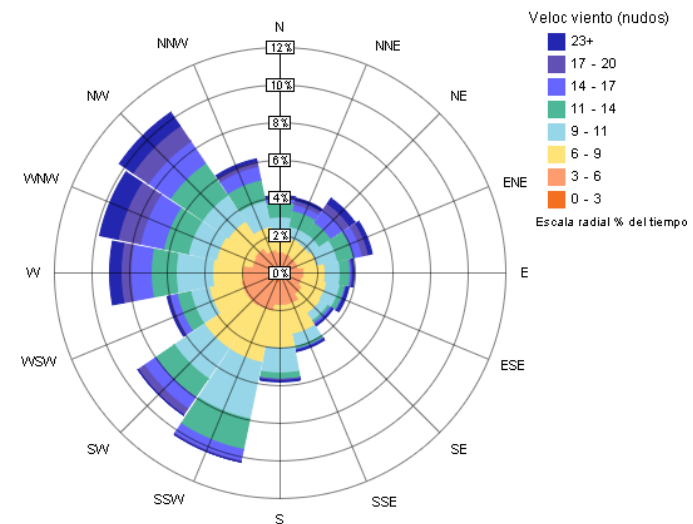
Distribución de Weibull

Permite describir en forma estadística la frecuencia de la distribución de velocidades de viento



Rosa de los vientos

Representa la frecuencia con que soplan los vientos en cada dirección.





ETAPAS DE SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA EN CFD

Pre-procesamiento

- Geometría
- Zona para el fluido
- Malla
- Condiciones de Frontera

Procesamiento

- Métodos de discretización de ecuaciones
- Modelos de turbulencia, viscosidad y energía
- Algoritmos de resolución

Post-procesamiento

- Gráficos tridimensionales
- Líneas de corriente
- Contornos de velocidad o presión





ESPE

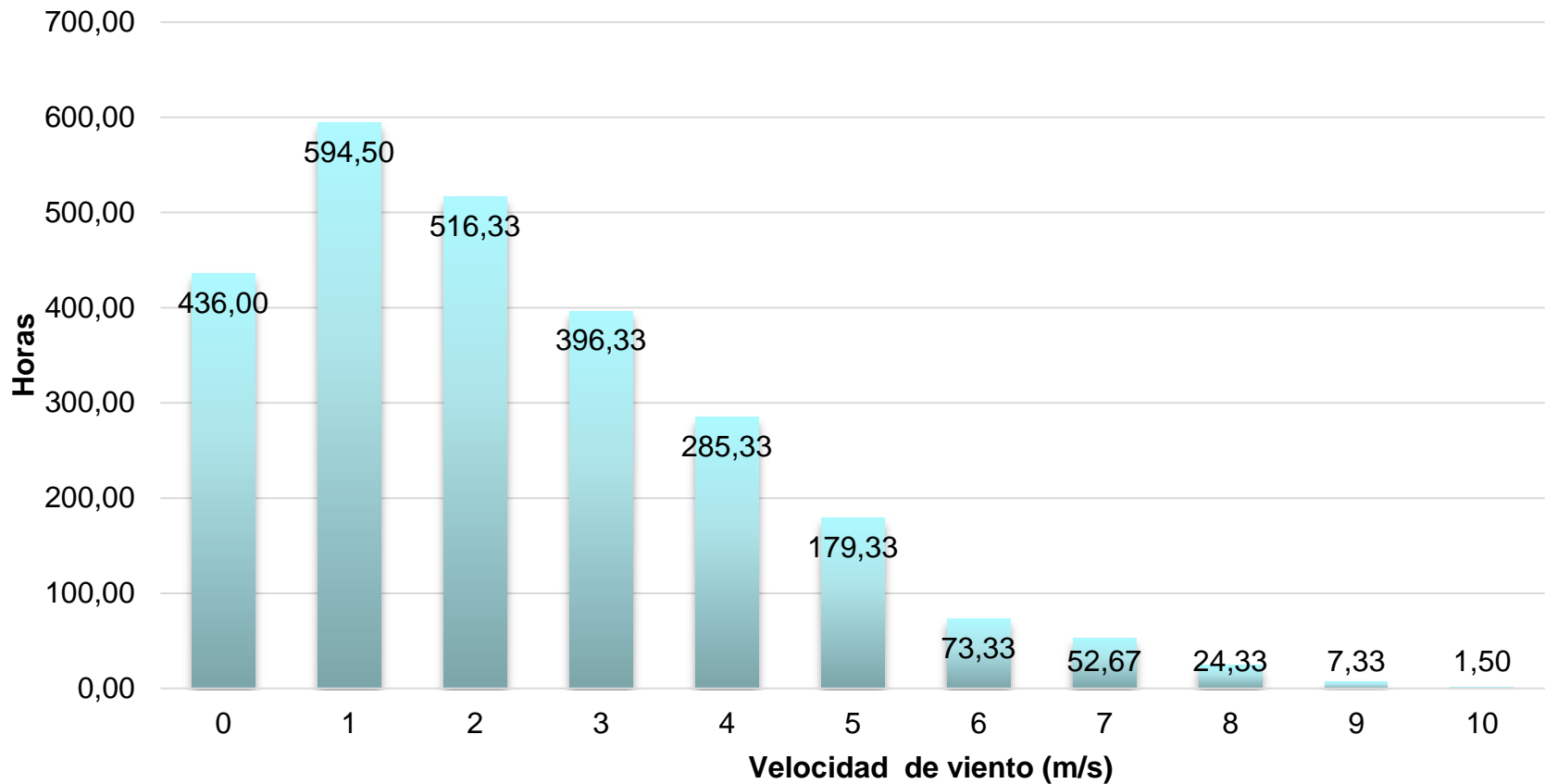
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ANÁLISIS BASE DE DATOS



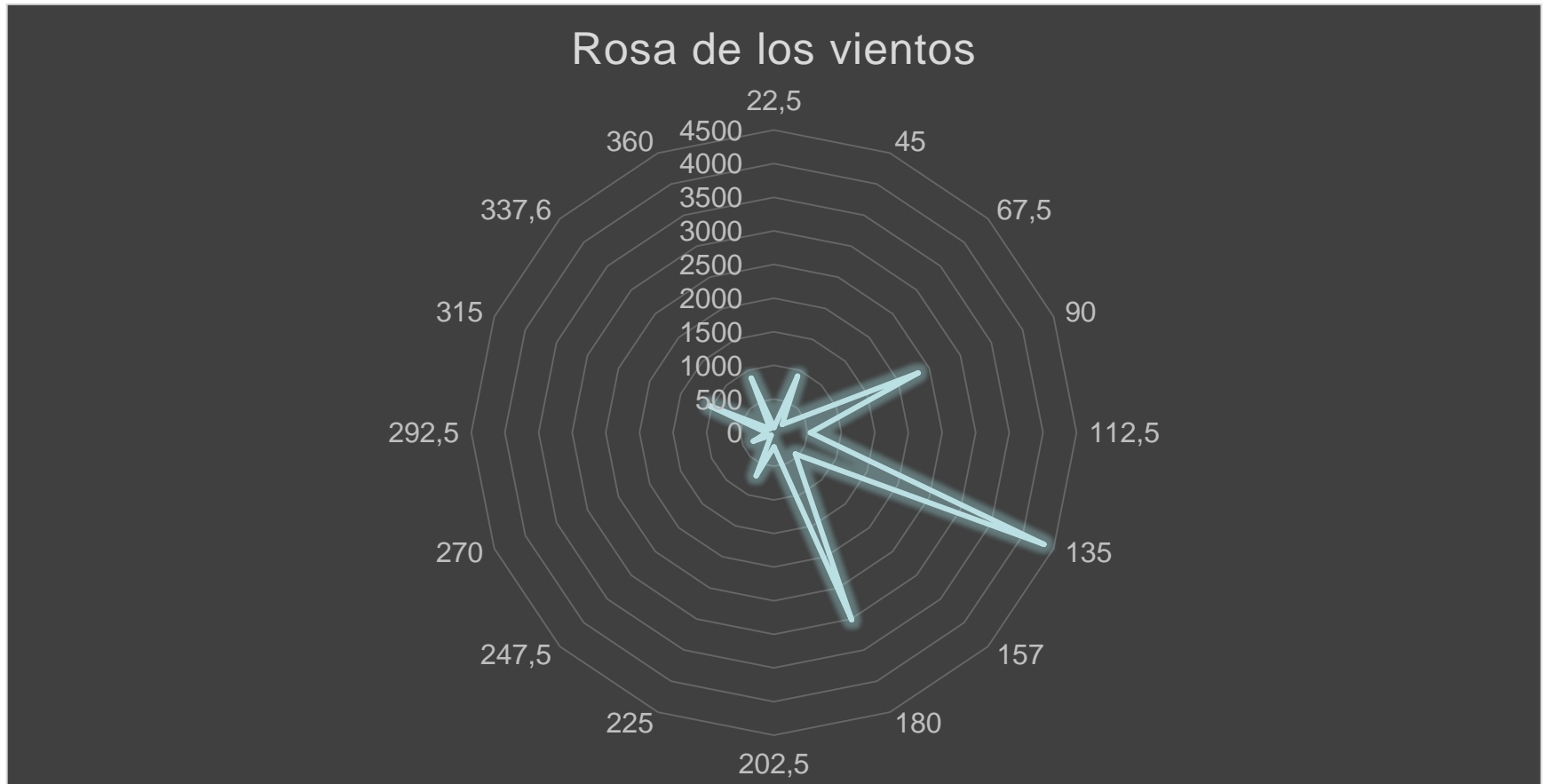


DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL





ROSA DE LOS VIENTOS





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ANÁLISIS AERODINÁMICO





NÚMERO DE REYNOLDS

Velocidad (m/s)	Raptor G5	Mach 5
2,6	274292,00	278788,59
5	527484,62	536131,91
10	1054969,24	1072263,82





ÁREA DE BARRIDO

Turbina	Radio (m)	Área de barrido (m^2)
Raptor G5	0,7747	1,88
Mach 5	0,7874	1,94



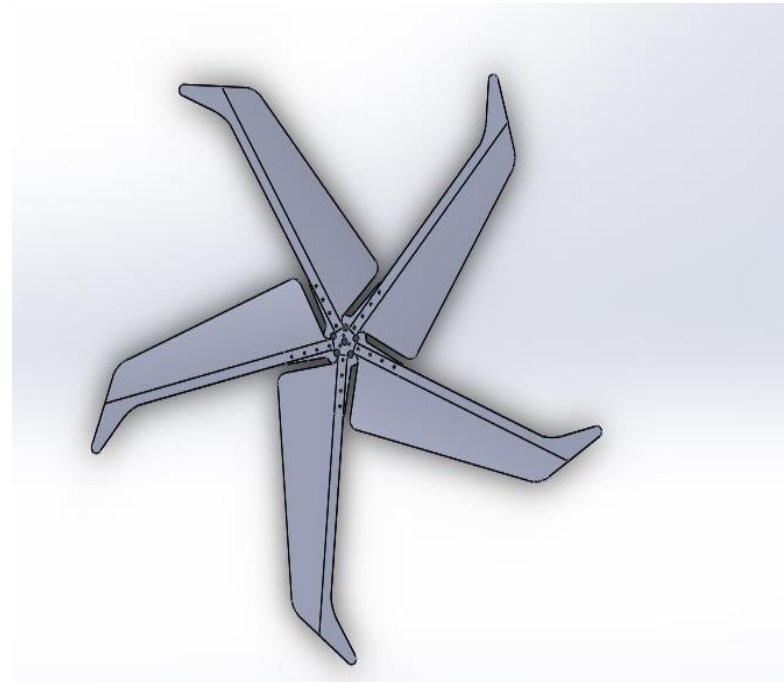


MODELADO DE TURBINAS

Raptor G5



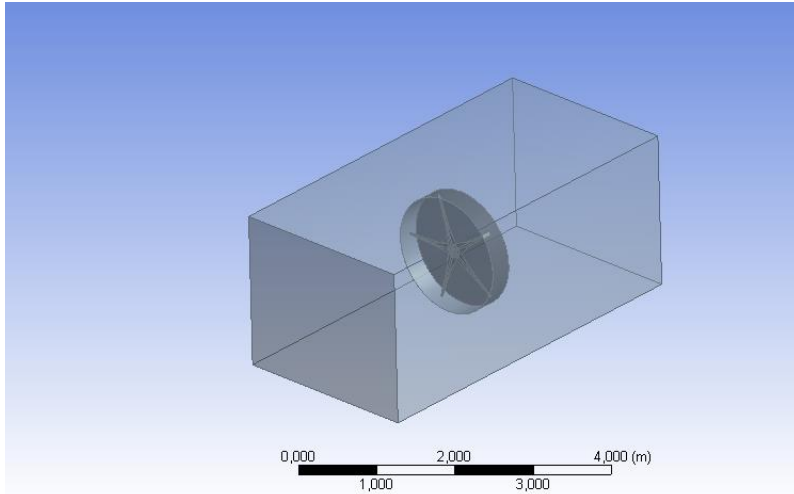
Mach 5



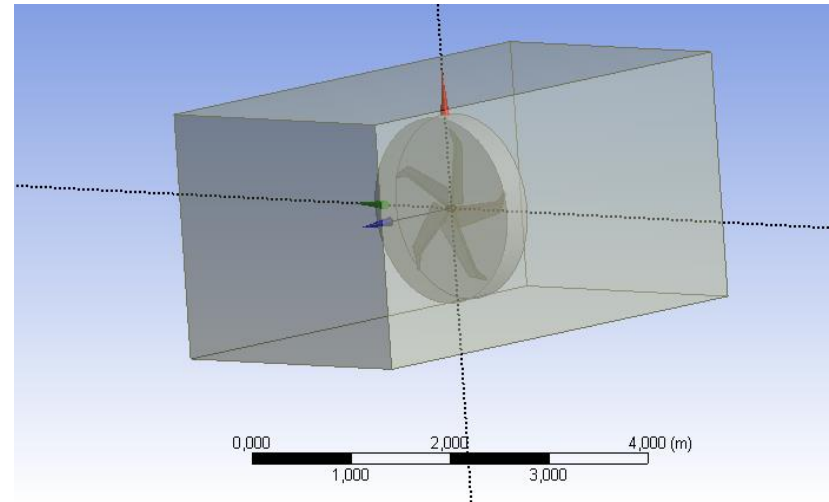


CREACIÓN DEL VOLÚMEN DEL FLUIDO

Raptor G5

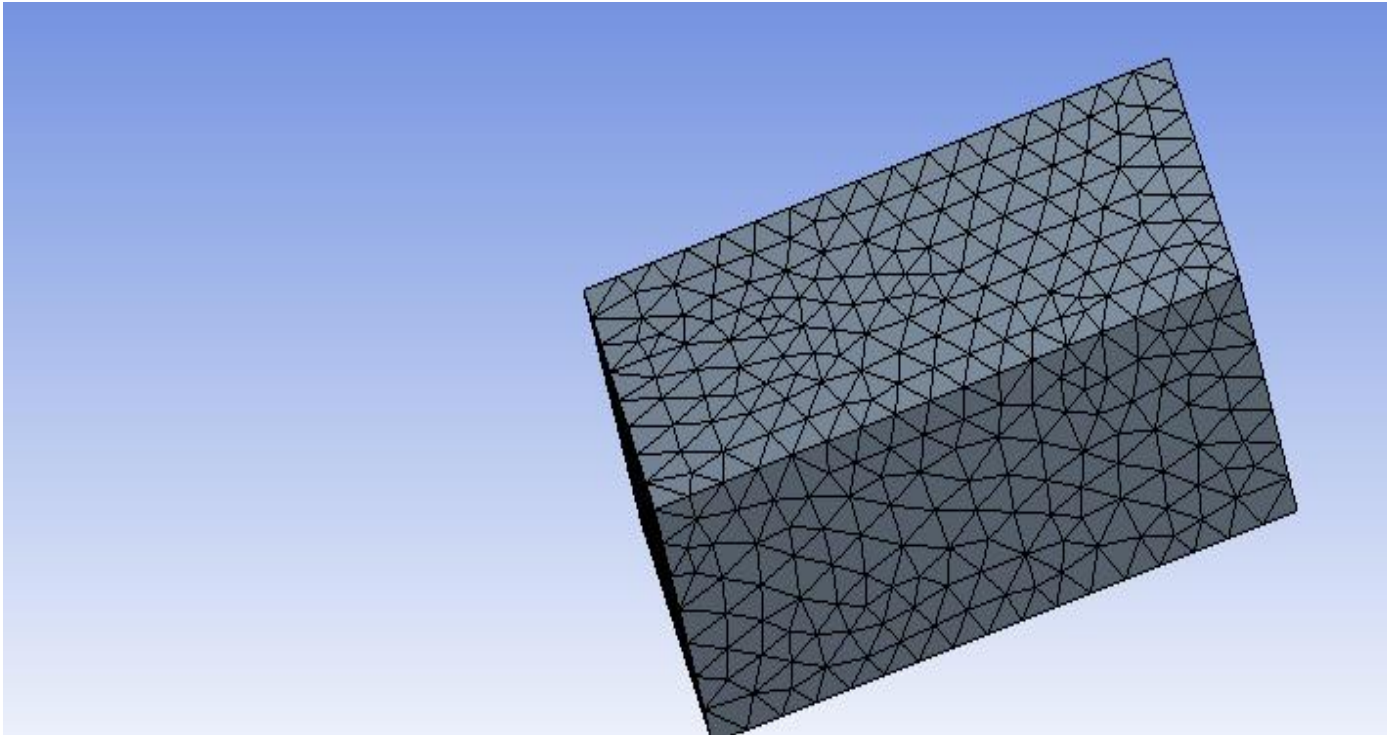


Mach 5





Mallado





CONDICIONES DE FRONTERA

Aquí se aplicaron las siguientes condiciones:

- Velocidades de Viento entrada de 2.6 ,5 y 10 m/s
- Presión de salida de 0 Pa.
- Fluido: Aire
- Tipo de Fluido: turbulento
- Rpm: 147 rpm para 2.6 m/s, 266 rpm para 5 m/s y 500 rpm para 10 m/s





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RESULTADOS OBTENIDOS PRIMER ANÁLISIS

Se realizó un análisis aerodinámico para cada una de las turbinas ya ensambladas a velocidades de viento de 2.6, 5 y 10 m/s.

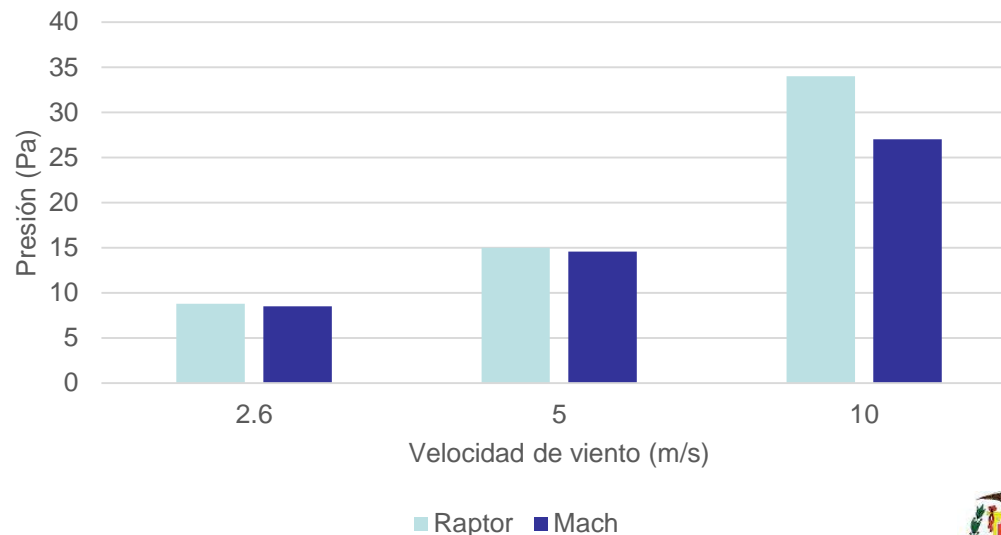




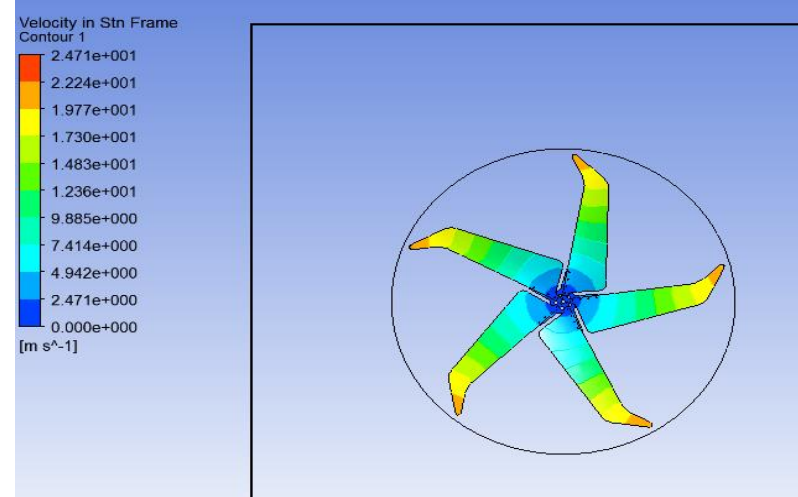
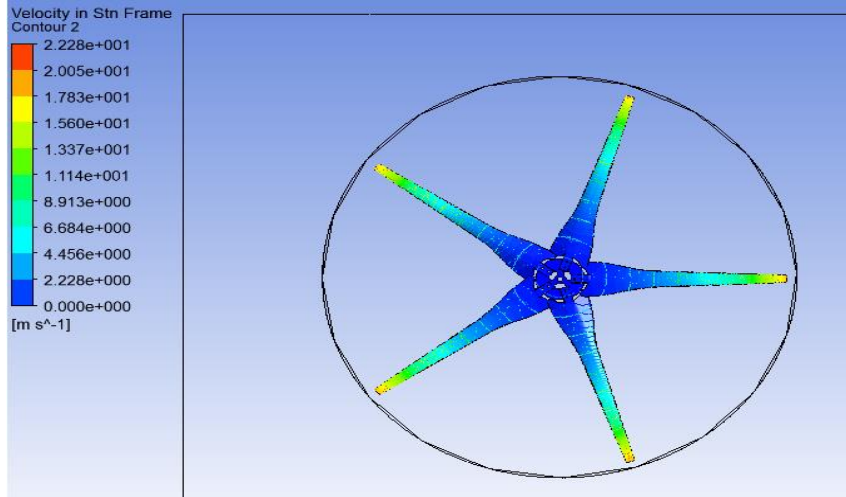
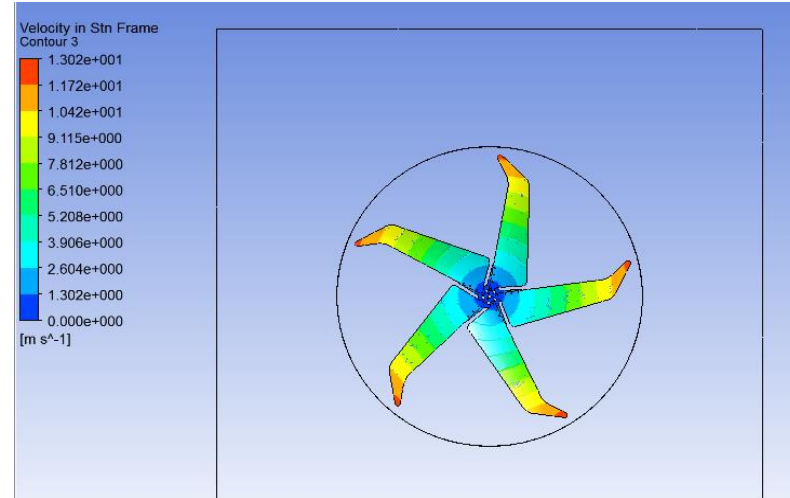
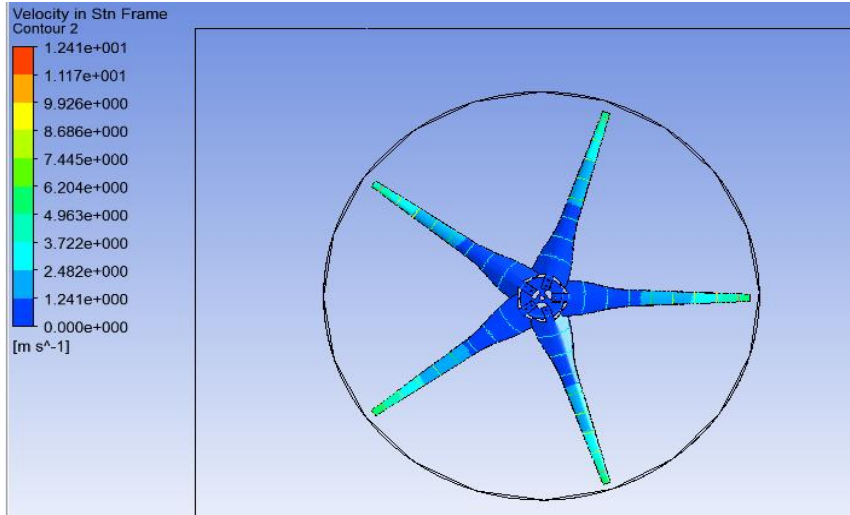
PRESIONES OBTENIDAS

Velocidad	Raptor (Pa)	Mach (Pa)
2,6	8,79	8,49
5	15	14,58
10	34	27

Presiones obtenidas a 2.6, 5 y 10 m/s



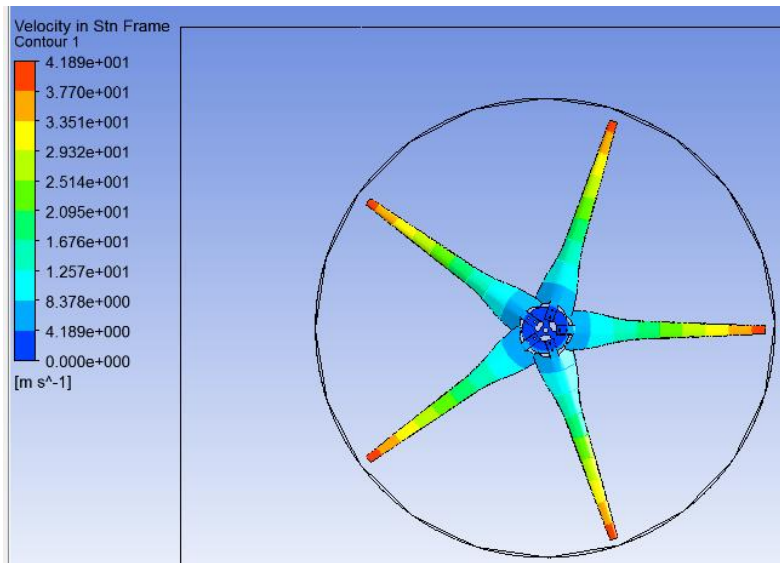
VELOCIDADES DE GIRO DE TURBINAS A 2.6 Y 5 m/s



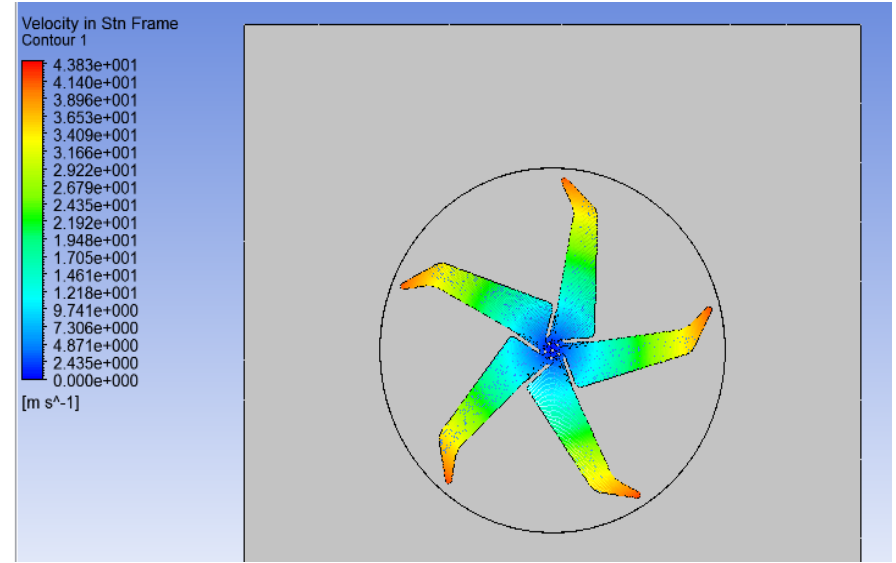


VELOCIDADES DE GIRO DE TURBINAS A 10 m/s

RAPTOR G5



MACH 5

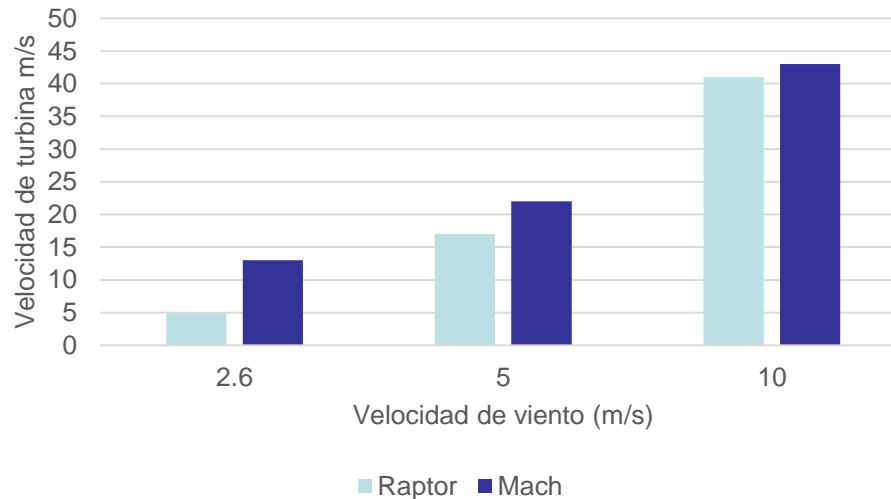




VELOCIDADES DE GIRO DE TURBINAS OBTENIDAS

Velocidad	Raptor (m/s)	Mach (m/s)
2.6	4,9	13
5	17	22
10	41	43

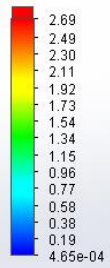
Comparación de velocidades de las turbinas





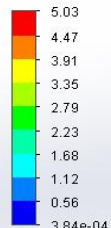
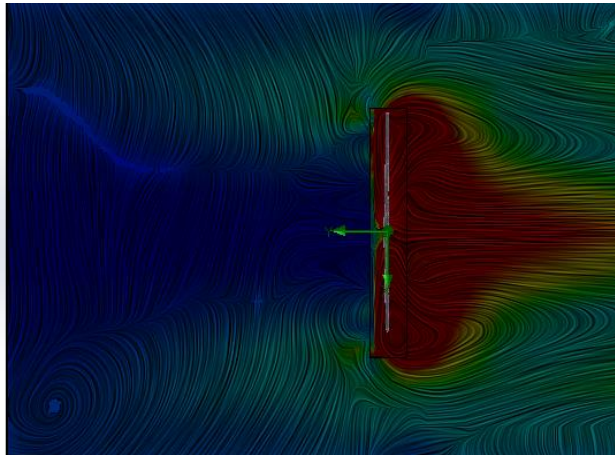
EFFECTO VÓRTICE A 2.6 Y 5 m/s

RAPTOR G5



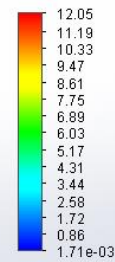
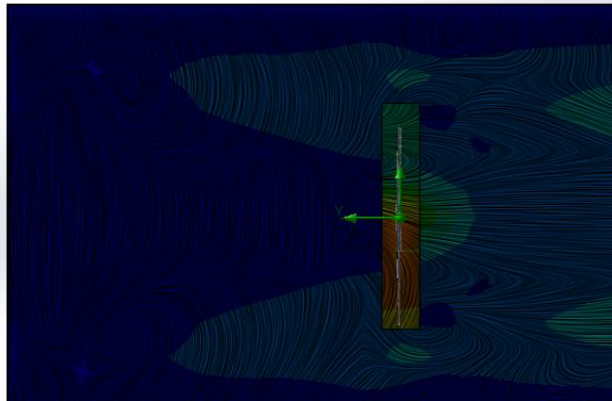
Vorticity [1/s]

Cut Plot 2: contours
Cut Plot 3: contours
Surface Plot 3: vectors
Flow Trajectories 1



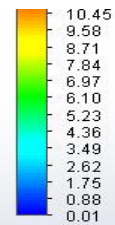
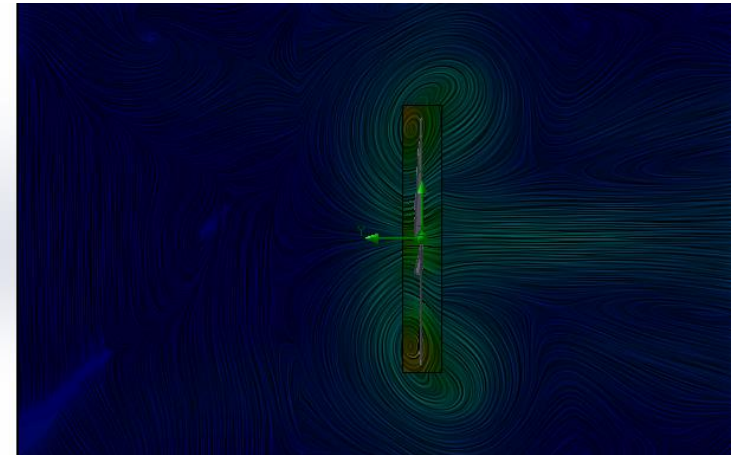
Vorticity [1/s]

Cut Plot 1: contours



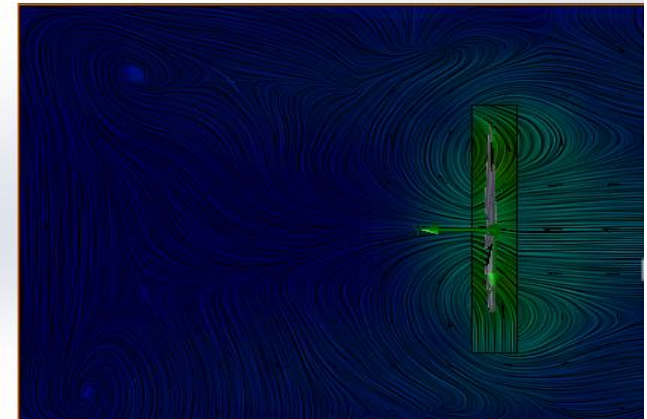
Vorticity [1/s]

Cut Plot 1: contours



Vorticity [1/s]

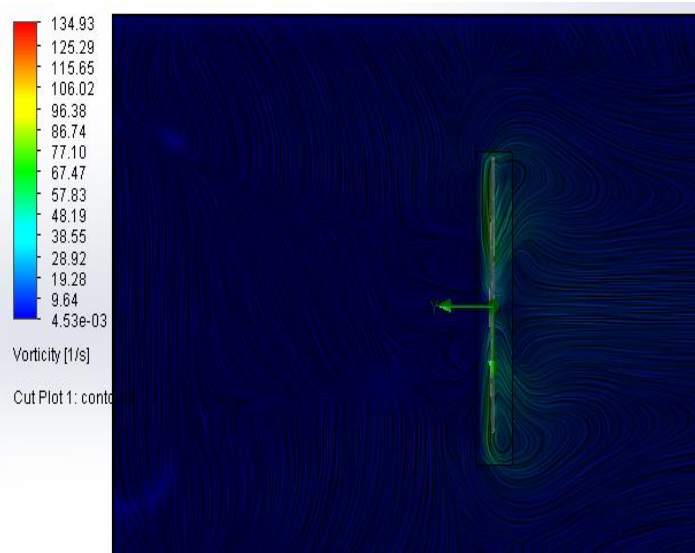
Cut Plot 2: contours
Flow Trajectories 2



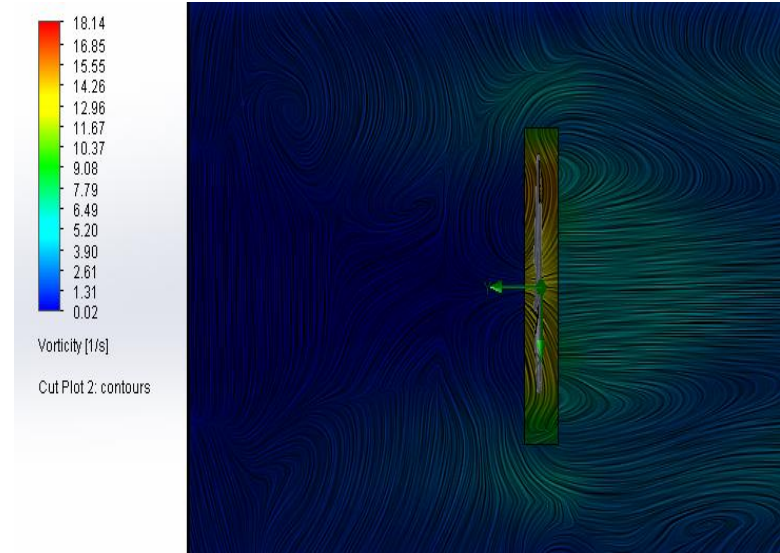


EFECTO VÓRTICE A 10 m/s

RAPTOR G5



MACH 5





DETERMINACIÓN DE EFICIENCIA AERODINÁMICA

RAPTOR G5

Velocidad m/s	FD (N)	FL(N)	FL/FD
2.6	0,0008116	0,0353306	43,532035
5	0,00248704	0,120466405	48,437663
10	0,10264492	0,658493823	6,4152597

MACH 5

Velocidad m/s	FD (N)	FL(N)	FL/FD
2.6	0,0005724	0,069238	120,969914
5	0,0024764	0,387332	156,412341
10	0,0257213	0,466897	18,1521626





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RESULTADOS OBTENIDOS SEGUNDO ANÁLISIS

Se realizó un análisis aerodinámico para cada una de las aspas aplicando ángulos de ataque de 0° , 20° , 40° , 60° y 80° para las velocidades de viento de 2.6, 5 y 10 m/s.



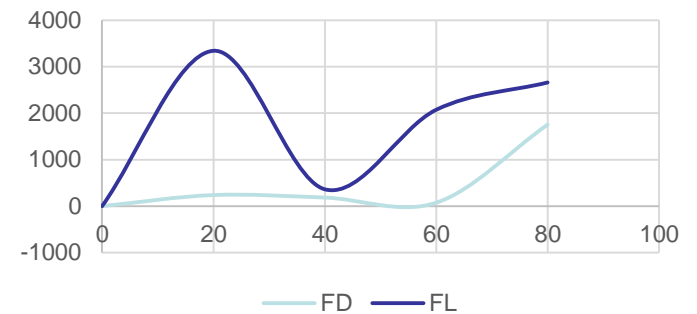


EFICIENCIA AERODINÁMICA VELOCIDAD DE 2.6 M/S

RAPTOR G5

Grados	FD (N)	FL (N)	FL/CD
0	0,033825192	0,18104289	5,35230931
20	240	3.343	13,9584672
40	185,14	363	1,95851788
60	75	2.074	27,7452008
80	1754,29	2.662	1,51716079

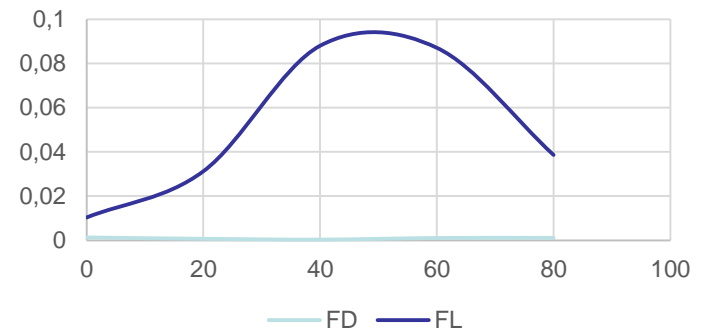
FL y FD Raptor para velocidad de 2.6 m/s



MACH 5

Grados	FD(N)	FL (N)	FL/CD
0	0,001290224	0,010327769	8,00463005
20	0,000686859	0,031233892	45,4735241
40	0,000312532	0,088024153	281,64853
60	0,001053886	0,08710829	82,6543606
80	0,001100196	0,038628401	35,1104626

FL y FD para Mach velocidad de 2.6 m/s



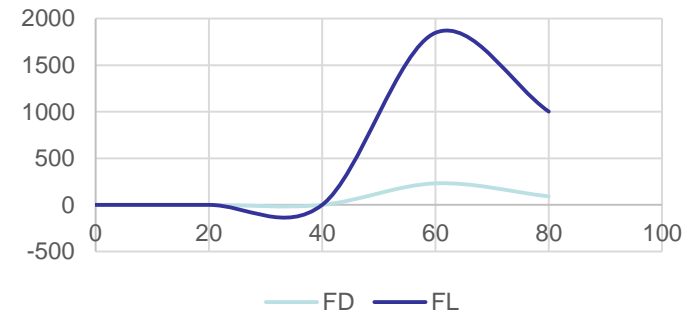


EFICIENCIA AERODINÁMICA VELOCIDAD DE 5 M/S

RAPTOR G5

Grados	FD (N)	FL (N)	FL/CD
0	0,057056372	0,43467211	7,61829213
20	0,083082626	0,21407092	2,57660272
40	0,064257049	0,1380787	2,14884907
60	231	1.847	7,98037114
80	91	1.001	10,966406

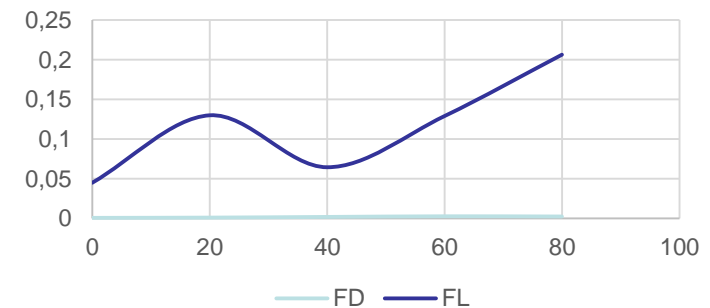
FL y FD para Raptor velocidad de 5m/s



MACH 5

Grados	FD (N)	FL (N)	FL/CD
0	0,000732611	0,044934256	61,3344166
20	0,001063041	0,12992925	122,224119
40	0,001921436	0,064507802	33,572704
60	0,002734375	0,12897863	47,1693293
80	0,002440327	0,20628136	84,5301987

FL y FD para Mach velocidad de 5 m/s



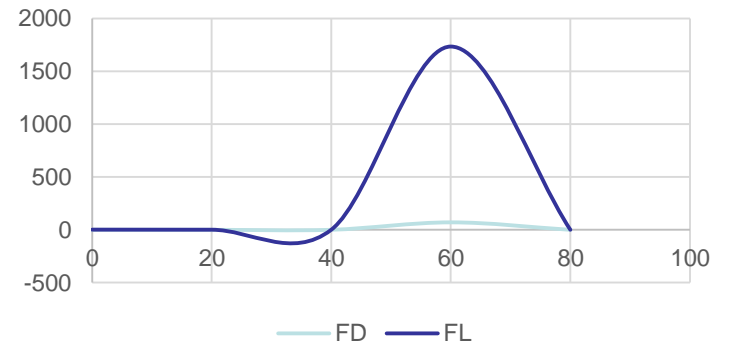


EFICIENCIA AERODINÁMICA VELOCIDAD DE 10 M/S

RAPTOR G5

Grados	FD (N)	FL (N)	FL/CD
0	0,22287501	2	8,14584865
20	0,33770035	1	3,17112523
40	0,28639037	0,3072202	1,0727323
60	71	1.735	24,5730452
80	0,1269299	0,46174854	3,63782324

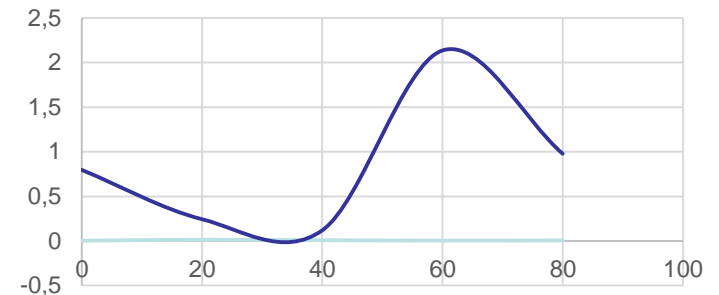
FL y FD para Raptor velocidad de 10 m/s



MACH 5

Grados	FD (N)	FL (N)	FL/CD
0	0,002922886	0,79637118	272,460531
20	0,013534344	0,2439562	18,0249741
40	0,008678065	0,11890711	13,7020302
60	0,00354553	2	602,389476
80	0,006133458	0,97767636	159,400522

FL y FD para Mach velocidad de 10 m/s





MAYORES EFICIENCIAS SEGUNDO ANÁLISIS

RAPTOR G5

Velocidad (m/s)	Ángulo de ataque	EA
2.6	60°	27,74
5	80°	10,96
10	60°	24,57

MACH 5

Velocidad (m/s)	Ángulo de ataque	EA
2.6	40°	281,64
5	20°	122,22
10	60°	602,38





DATOS OBTENIDOS A MAYORES EFICIENCIAS

RAPTOR G5

Velocidad (m/s)	Ángulo de ataque	Presión (Pa)	Velocidad de 60 cm (m/s)	Velocidad de 10 cm (m/s)
2.6	60°	1.62	3.39	2.97
5	80°	763	7.36	6.06
10	60°	18.84	16	12.85

MACH 5

Velocidad (m/s)	Ángulo de ataque	Presión (Pa)	Velocidad de 60 cm (m/s)	Velocidad de 10 cm (m/s)
2.6	40°	3.48	2.54	2.9
5	20°	16	1.89	4.72
10	60°	52	2.49	4.99





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RESULTADOS PRUEBAS REALES

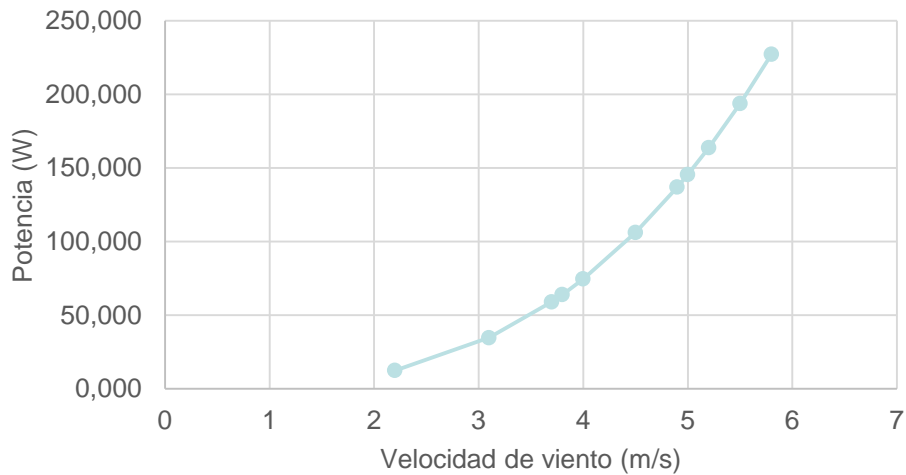
Se determinó los voltajes y corrientes generados por el aerogenerador aplicando una carga de 240 W.



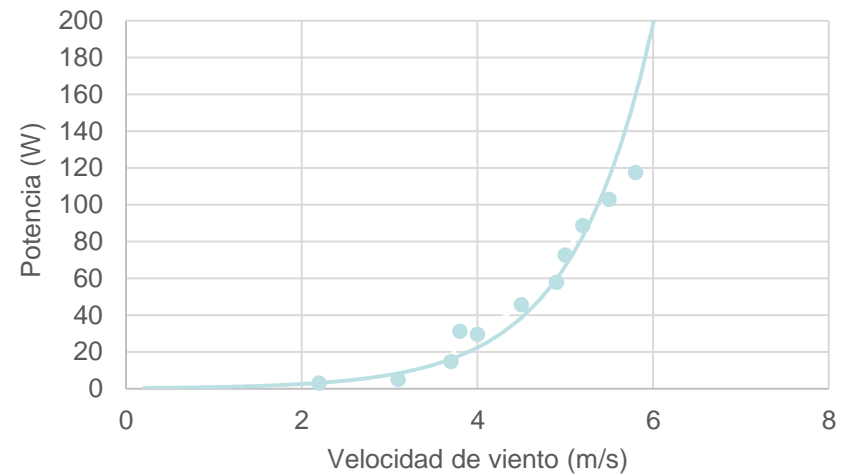


POTENCIAS RAPTOR G5

Potencia eólica Raptor G5



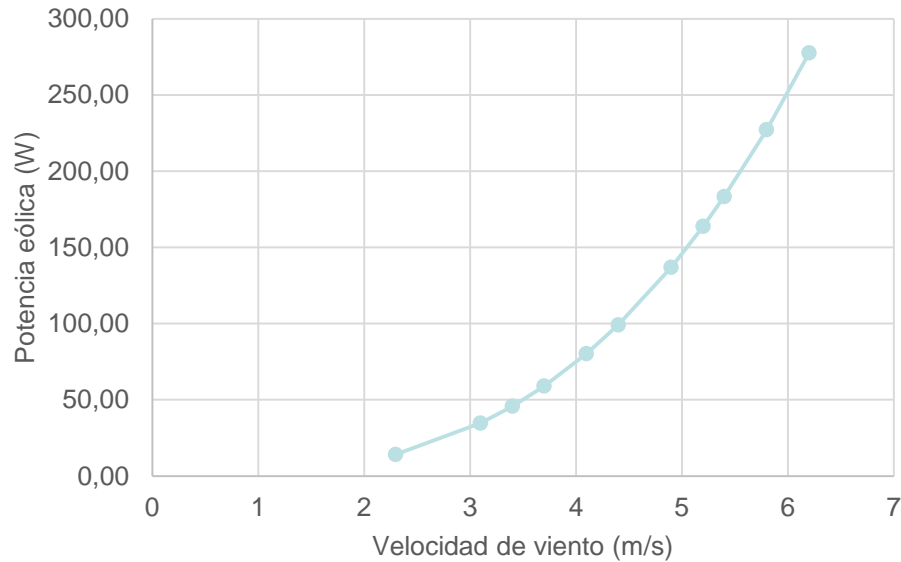
Potencia Eléctrica Raptor G5



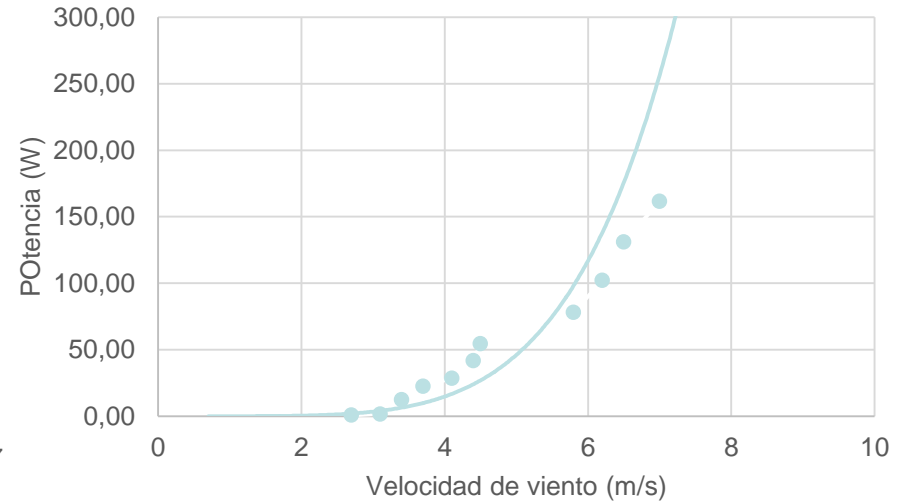


POTENCIAS MACH 5

Curva Potencia Eólica Mach 5



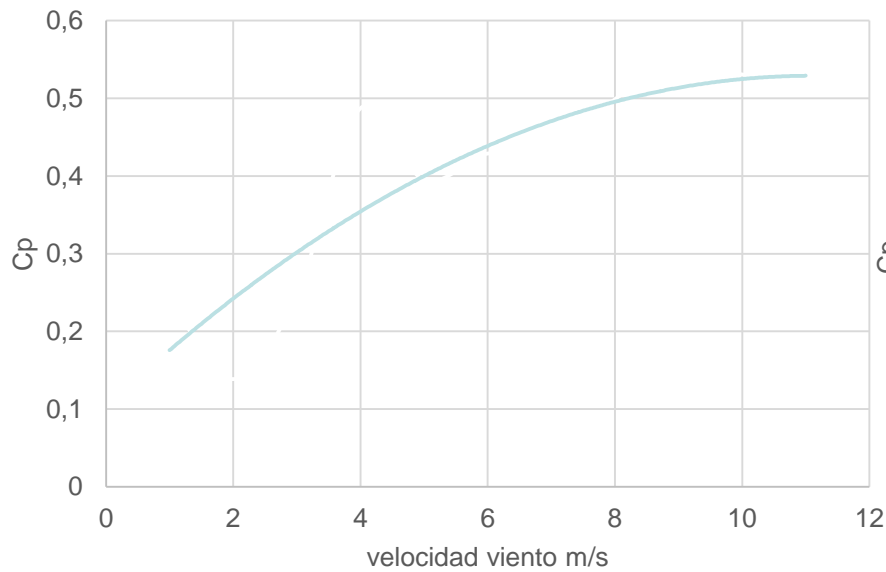
Curva Potencia Eléctrica Mach 5



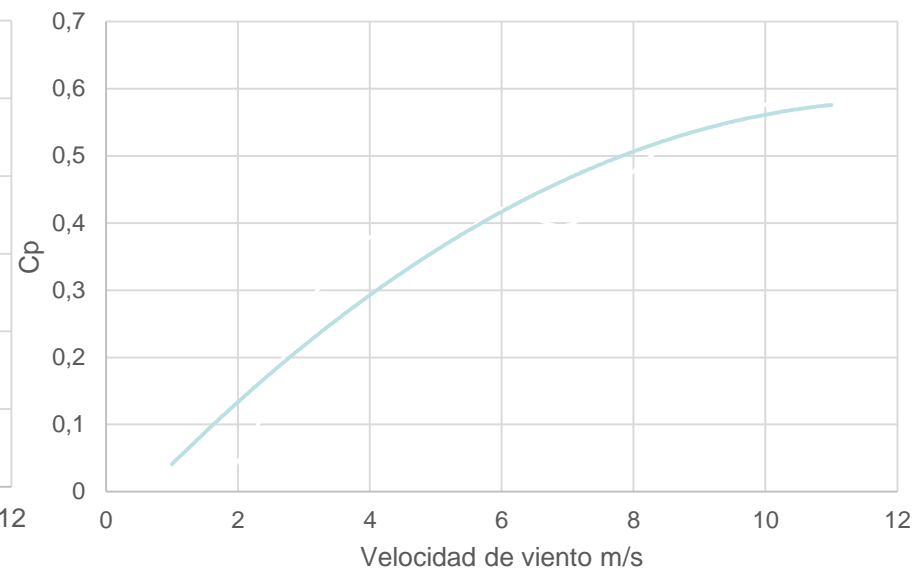


GRÁFICAS CP

Cp Raptor G5



Cp Mach 5





Coeficientes de Potencia

Los coeficientes de potencias se calcularon con la fórmula $C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{aire}}$ para se sumaron las potencias para determinar una potencia total

$$C_p = \frac{567,56}{1217,68} = 0,46$$

$$C_p = \frac{634,01}{1321,71} = 0,5$$





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES





- Se realizó la implementación de los aerogeneradores multipala de bajas velocidades de viento tipo Raptor G5 y Mach 5 en la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga para lo cual se realizó un diseño adecuado para la torre que tiene una altura de 6m y es capaz de soportar un peso de 227 N, además el aerogenerador cuenta con su respectivo sistema de protección.
- Se utilizó el módulo de Ansys Fluent que utiliza técnicas de dinámica computacional de fluidos (CFD) para realizar cada uno de los análisis aerodinámicos, cuyo módulo está compuesto de las interfaces Geometry donde establecieron las operaciones de diseño de la turbina, la interface Mesh donde se realizaron las operaciones de mallado y la interface Fluent donde se establecieron las condiciones de frontera para el análisis.





- Se determinó que la condición de operación mínima a la que el aerogenerador estará sometido será a velocidades inferiores a 2.6 m/s, mientras que la máxima condición de operación será para una velocidad de 10 m/s que son las velocidades máximas a presentarse en la zona, estos datos se obtuvieron mediante la tabulación de los datos obtenidos de la estación meteorológica PCE-FWS 20.
- Se determinó una mayor eficiencia aerodinámica para el aerogenerador Mach de 156 a una velocidad de 5 m/s mediante el análisis aerodinámico en CFD es decir que a esta velocidad el aerogenerador está dentro de los casos ideales de eficiencia aerodinámica.





- Se determinó una mayor eficiencia aerodinámica para el aerogenerador Raptor de 48,43 a una velocidad de 5 m/s mediante el análisis aerodinámico en CFD, sin embargo, se considera casos ideales cuando el valor es mayor a 150 por lo que este valor es muy bajo y no estaría dentro de los casos ideales de eficiencia aerodinámica.
- Se determinó un coeficiente de potencia C_p de 0,5 para el aerogenerador Mach 5 mediante al análisis de los datos obtenidos en las diferentes pruebas en el aerogenerador cuyo valor está dentro de los rangos aceptables de C_p que va de 0 a 0,56.
- Se determinó un coeficiente de potencia C_p de 0,46 para el aerogenerador Raptor G5 mediante al análisis de los datos obtenidos en las diferentes pruebas en el aerogenerador cuyo valor está dentro de los rangos aceptables de C_p que va de 0 a 0,56.





- Al comparar los datos obtenidos mediante el análisis aerodinámico en Ansys Fluent se determinó que el aerogenerador más eficiente es el aerogenerador Mach 5 que alcanza valores de eficiencias aerodinámicas de más de 150 a diferentes velocidades, mientras que el aerogenerador Raptor G5 no alcanza eficiencias mayores a 50 a diferentes velocidades de viento.
- Al comparar los valores de C_p obtenidos mediante al análisis de las curvas de potencia eléctrica y eólica se determinó que el aerogenerador con mayor eficiencia aerodinámica es el aerogenerador Mach 5 que alcanza valores de 0,5 mientras que el aerogenerador Raptor G5 tiene un C_p de 0,46.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RECOMENDACIONES





- Implementar un análisis matemático en el software Matlab que me permita comparar datos de fuerza de arrastre y sustentación.
- Implementar un sistema de monitoreo de datos por red que me permita visualizar datos en tiempo real de la energía generada por el aerogenerador.
- Realizar un rediseño para las aspas del aerogenerador Raptor G5 que fueron las aspas con menor eficiencia aerodinámica.





**GRACIAS POR SU
ATENCIÓN**



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA