

## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	2
1.2 DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	2
1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA .....	3
1.4 OBJETIVOS .....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos .....	4
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES .....	4
1.6 METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS .....	5
1.7 RESULTADOS ESPERADOS.....	5
1.8 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO .....	6
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
2.1. PRINCIPALES CONCEPTOS EN LA MECÁNICA DE FLUIDOS.....	8
2.1.1 Teorema de transporte de Reynolds (RTT).....	10
2.1.2 Leyes de conservación y análisis diferencial de flujo de fluidos .....	12
2.1.2.1 Ecuación de continuidad (Conservación de la Masa) .....	12
2.1.2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes (Conservación del Impulso) .....	13
2.1.2.3 Fluido newtoniano.....	14
2.1.2.4 Hipótesis de Stokes .....	15
2.1.3 Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS).....	15
2.2 AERODINÁMICA .....	18
2.3 GEOMETRÍA Y NOMENCLATURA DE UN PERFIL AERODINÁMICO.....	18
2.4 FUERZAS AERODINÁMICAS Y MOMENTO SOBRE UN PERFIL ALAR.....	20
2.5 COEFICIENTES ADIMENSIONALES Y CONCEPTO DE PÉRDIDA AERODINÁMICA .....	21
2.6 CAPA LÍMITE Y ZONA DE TRANSICIÓN.....	24
2.7 FUNCIÓN DE LAS PROTUBERANCIAS EN LA BALLENA JOROBADA .....	26
2.8 MÉTODOS DE MODELAMIENTO MÁS UTILIZADOS.....	27
2.8.1 Metodología BEM.....	27
2.8.2 Metodología de pérdida aerodinámica .....	28
2.8.3 Metodología CFD .....	28
2.8.3.1 Procedimiento de solución .....	29
2.8.4 Modelos de turbulencia.....	30

2.8.4.1 Modelo realizable k- $\epsilon$ .....	31
2.9 PROPUESTA DE ANÁLISIS PARA SIMULACIÓN CFD .....	32
2.9.1 Variación de la cuerda en perfil aerodinámicos .....	32
<b>CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO DE SIMULACIONES EN ANSYS FLUENT .34</b>	
3.1 SELECCIÓN DE PERFILES AERODINÁMICOS.....	35
3.2 DETERMINACIÓN DEL DOMINIO DE ANÁLISIS .....	35
3.2.1 Calidad ortogonal y la relación de aspecto .....	36
3.2.2 Diseño de la geometría de estudio .....	37
3.2.2.1 Geometría paramétrica .....	37
3.2.2.2 Geometría modificada .....	38
3.2.3 Diseño del dominio de estudio.....	39
3.2.4 Diseño de la malla 3D en ANSYS FLUENT.....	41
3.3 CONFIGURACIONES DEL MODELO.....	45
3.3.1 Configuraciones .....	45
3.3.1.1 Modelo.....	46
3.3.1.2 Material de estudio .....	46
3.3.1.3 Condiciones de borde .....	47
3.3.2 Soluciones .....	48
3.3.2.1 Metodología de solución .....	48
3.3.2.2 Monitores.....	49
3.3.2.3 Método de inicio.....	49
3.3.2.4 Realizar cálculo .....	50
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>51</b>
4.1 RESULTADOS SIMULACIONES GEOMETRÍA PARAMÉTRICA .....	52
4.1.1 Recursos computacionales utilizados.....	52
4.1.1.1 Características de mallado, calidad y tiempo empleado.....	52
4.1.1.2 Conservación de masa y coeficientes aerodinámicos.....	53
4.1.1.1 Distribución del coeficiente de presión para $\alpha:18^\circ$ .....	54
4.1.1.2 Perfil de presión y velocidad para $\alpha: 18^\circ$ .....	54
4.1.1.3 Evolución de la convergencia para coeficientes de arrastre y sustentación.....	56
4.1.1.4 Coeficientes de sustentación $C_l$ y arrastre $C_d$ .....	57
4.2 RESULTADOS SIMULACIONES GEOMETRÍA MODIFICADA.....	59
4.2.1 Recursos computacionales utilizados.....	59
4.2.1.1 Características de mallado, calidad ortogonal y tiempo empleado .....	59

4.2.1.2 Conservación de masa y coeficientes aerodinámicos.....	60
4.2.1.3 Distribución del coeficiente de presión para $\alpha:18^\circ$ .....	61
4.2.1.4 Perfil de presión y velocidad para $\alpha:18^\circ$ .....	61
4.2.1.5 Evolución de la convergencia para coeficientes de arrastre y sustentación.....	63
4.2.1.6 Coeficientes de sustentación $C_l$ y arrastre $C_d$ .....	64
4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS .....	66
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....</b>	<b>68</b>
5.1 CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....	69
5.2 LIMITACIONES DEL ESTUDIO .....	70
5.3 PROYECCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	70
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1: Aleta de ballena jorobada (izq.); perfil aerodinámico para generador eólico prototipo (der.) [21] .....	3
Figura II.1: Líneas de flujo sobre un perfil aerodinámico [9] .....	9
Figura II.2: Definición de un perfil alar [9].....	19
Figura II.3- Nomenclatura perfil alar [6].....	19
Figura II.4- Presión y cizallamiento sobre un perfil alar [9] .....	20
Figura II.5- Fuerza y momento resultante sobre perfil alar [9] .....	20
Figura II.6- Descomposición de fuerza resultante R sobre un perfil alar [9] .....	21
Figura II.7- Gradiente de presiones [11] .....	22
Figura II.8- Stall o entrada en pérdida aerodinámica [5].....	23
Figura II.9- Transición de la capa límite [11].....	24
Figura II.10:Generadores de vórtices [23].....	25
Figura II.11-Alerones ubicados en el borde de salida [5].....	25
Figura II.12- Metodología de simulación BEM [24].....	27
Figura II.13- Simulación CFD en ANSYS® FLUENT de perfil aerodinámico [25].....	29
Figura II.14- Variación de la cuerda en perfil aerodinámico [19].....	32
Figura II.15- Longitud de onda y amplitud. Variaciones de perfiles aerodinámicos [11] ...	33
Figura III.1-Dominio recomendado para perfiles aerodinámicos [1].....	36
Figura III.2-Diseño de perfil mediante herramienta spline en Inventor Professional [19]...	37
Figura III.3-Perfil NACA 0012 en 3 dimensiones [19].....	38
Figura III.4-Perfiles NACA 0012 utilizando Inventor® Professional 2016 [19].....	39
Figura III.5-Perfil modificado de la forma $f(x)=A\sin(x)$ para en un período completo de 360 mm [19] .....	39
Figura III.6-Selección módulo de análisis y creación de nuevo proyecto [19] .....	40
Figura III.7- Dominio de estudio del comportamiento del fluido [19].....	40
Figura III.8-Cuerpo de influencia, caja rectangular de color verde, diseñada en torno al perfil aerodinámico [19].....	41
Figura III.9-Malla por defecto en el módulo Mesh de ANSYS® FLUENT [19] .....	42
Figura III.10-Refinado de malla del tipo cuerpo de influencia [19].....	42
Figura III.11-Refinamiento de caras, selección del perfil aerodinámico [19].....	43

Figura III.12- Refinamiento de cuerpo con esfera de influencia en torno al perfil aerodinámico [19].....	43
Figura III.13-Malla refinada Visión general (izq.); plano de corte transversal cercano al perfil aerodinámico (der.) [19].....	44
Figura III.14: Asignación de nombre a las zonas o cuerpos de interés [19].....	44
Figura III.15: cuadro configuraciones de Inicio en FLUENT [19] .....	45
Figura III.16: selección del modelo turbulento [19].....	46
Figura III.17: Selección del algoritmo de cálculo SIMPLE y nivel de discretización espacial [19] .....	48
Figura III.18: Monitores: coeficiente de sustentación (izq.) y coeficiente de arrastre (der.) [19] .....	49
Figura III.19:configuración de parámetros para realizar los cálculos del modelo de estudio [19] .....	50
Figura IV.1: Distribución de presión a lo largo del perfil paramétrico, $\alpha: 18^\circ$ [19].....	54
Figura IV.2: Distribución de presión en torno al perfil paramétrico para $\alpha:18^\circ$ [19].....	55
Figura IV.3: Distribución de velocidad en torno al perfil paramétrico para $\alpha:18^\circ$ [19].....	55
Figura IV.4: Distribución de presión a lo largo del perfil modificado, $\alpha: 18^\circ$ [19] .....	61
Figura IV.5: Distribución de presión en torno al perfil modificado para $\alpha:18^\circ$ [19] .....	62
Figura IV.6: Distribución de velocidad en torno al perfil modificado para $\alpha:18^\circ$ [19].....	62

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico II-1: Curvas de coeficiente de sustentación (izq.) y arrastre (der.) de un perfil alar NACA 63-215 [22].....	23
Gráfico IV-1: Evolución del coeficiente de arrastre $C_d$ para $\alpha$ : $18^\circ$ [19].....	56
Gráfico IV-2: Evolución del coeficiente de sustentación $C_l$ para $\alpha$ : $10^\circ$ [19] .....	56
Gráfico IV-3: Coeficiente de sustentación en función de $\alpha$ ; perfil paramétrico [19].....	57
Gráfico IV-4: Coeficiente de arrastre en función de $\alpha$ ; perfil paramétrico [19].....	58
Gráfico IV-5: Coeficiente de planeo; perfil paramétrico [19].....	58
Gráfico IV-6: Evolución del coeficiente $C_d$ para perfil modificado con $\alpha$ : $18^\circ$ [19].....	63
Gráfico IV-7: Evolución del coeficiente $C_l$ para perfil modificado, con $\alpha$ : $18^\circ$ [19].....	63
Gráfico IV-8: Historial $C_l$ perfil modificado [19] .....	64
Gráfico IV-9: Historial $C_d$ perfil modificado [19].....	65
Gráfico IV-10: Coeficiente de planeo, perfil modificado [19].....	65
Gráfico IV-11: Coeficiente de sustentación para perfiles paramétrico y modificado [19] ..	66
Gráfico IV-12: Coeficiente de arrastre para perfiles paramétrico y modificado [19] .....	67
Gráfico IV-13: Coeficiente de planeo para los perfiles paramétrico y modificado [19].....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla III-1: Determinación del material de estudio y sus propiedades .....	47
Tabla III-2: Condiciones de borde.....	47
Tabla IV-1: Requerimientos computacionales utilizados.....	52
Tabla IV-2: Tiempo de cálculo y calidad de malla .....	52
Tabla IV-3: Conservación de masa y coeficientes aerodinámicos .....	53
Tabla IV-5: Requerimientos computacionales utilizados.....	59
Tabla IV-6: Tiempo de cálculo y calidad de malla .....	59
Tabla IV-7: Conservación de masa y coeficientes aerodinámicos .....	60