



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y  
LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PALAS  
DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL DE RADIO  
MÁXIMO 80cm BASADOS EN PERFILES ALARES NACA,  
APLICANDO TECNOLOGÍA CAD-CAM-CNC

TESIS DE GRADO PREVIO A OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTROMECAÁNICO

AUTOR: RAÚL ALBERTO CHÁVEZ ROMERO

DIRECTOR: Ing. JORGE LUIS MALDONADO CORREA Mg. Sc.

LOJA-ECUADOR

2013

## CERTIFICACIÓN

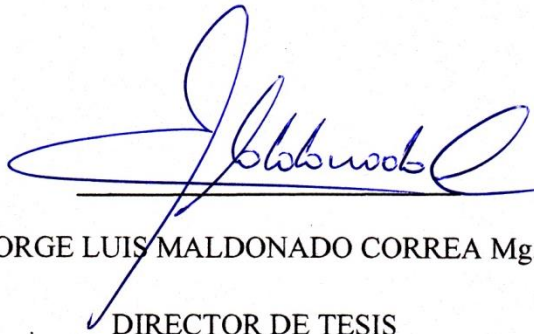
Ing. JORGE LUIS MALDONADO CORREA Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

### CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **“METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PALAS DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL DE RADIO MÁXIMO 80cm BASADOS EN PERFILES ALARES NACA, APLICANDO TECNOLOGÍA CAD-CAM-CNC”**, previa a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, realizado por el señor egresado: **Raúl Alberto Chávez Romero**, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, octubre de 2013



Ing. JORGE LUIS MALDONADO CORREA Mg. Sc.  
DIRECTOR DE TESIS



## **AUTORÍA**

Yo Raúl Alberto Chávez Romero, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

**Autor:** Raúl Alberto Chávez Romero

**Firma:** 

**Cédula:** 1104088214

**Fecha:** Loja, 09 de diciembre de 2013

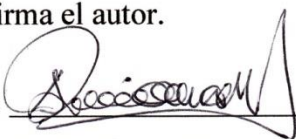
**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.**

Yo Raúl Alberto Chávez Romero, declaro ser autor de la tesis titulada: **“METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PALAS DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL DE RADIO MÁXIMO 80cm BASADOS EN PERFILES ALARES NACA, APLICANDO TECNOLOGÍA CAD-CAM-CNC”**, como requisito para optar al grado de **Ingeniero Electromecánico**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio de la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los días del mes de del dos mil trece, firma el autor.

**Firma:** 

**Autor:** Raúl Alberto Chávez Romero

**Cédula:** 1104088214

**Dirección:** El Valle, calles: Guayaquil y Portoviejo 09-56 (esquina); **Correo Electrónico:** chiche.9@hotmail.com

**Teléfono:** 2562153 **Celular:** 0993453034

**DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director de Tesis:** Ing. Jorge Luis Maldonado Correa Mg. Sc.

**Tribunal de Grado:** Ing. Milton Amable León Tapia, Mg. Sc.

Ing. Gonzalo Ramiro Riofrío Cruz

Ing. Julio César Cuenca Tinitana, Mg. Sc.

## **PENSAMIENTO**

A pesar de las opiniones de los demás acerca de ti, cuando las cosas no salgan como esperas, trata de buscar el lado positivo, todo tiene una razón de ser, jamás te des por vencido, lucha por aquello que deseas con el corazón, por tus sueños, aprovecha cada oportunidad, la vida es muy corta, ¿por qué no arriesgarse?... Y por encima de todo, sé la persona que quieres ser, no la que los demás esperan que seas...

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres, quienes siempre me han guiado pacientemente y que me han apoyado incondicionalmente pese a los problemas que les he causado a lo largo de mi vida. A mis hermanas que con su cariño me animaron en momentos difíciles; a mis familiares, amigos, y todos aquellos que me estiman y han creído en mí. Y finalmente a mi novia Dianita quien cada día me da razones para ser una mejor persona y para seguir luchando por mis sueños.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar agradezco a Dios por todo lo que tengo, y por las personas que ha puesto en mi camino.

A mi familia y a mi novia por su comprensión y amor incondicional.

A todos los maestros que aclararon mis dudas planteadas en clase.

Al Ing. Darwin Tapia por la orientación prestada para realizar este trabajo de investigación.

Al Ing. Numan León por sus acertados consejos y generosa ayuda.

Al Ing. Jorge Maldonado por la apreciable asesoría en el presente trabajo de tesis.

# ÍNDICE

<b>PENSAMIENTO</b>	<b>I</b>
<b>AUTORÍA</b>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
<b>PENSAMIENTO</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XXII</b>
<b>SIMBOLOGÍA</b>	<b>XXIII</b>
<b>a. TÍTULO</b>	<b>1</b>
<b>b. RESUMEN</b>	<b>2</b>
<b>Summary</b>	<b>3</b>
<b>c. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>d. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>7</b>
<b>d.1. ENERGÍA EÓLICA</b>	<b>7</b>
d.1.1. Turbinas Eólicas	9
d.1.1.1. Turbinas Eólicas tipo horizontal	10
- <b>Molino de viento</b>	10
- <b>Multipala</b>	10
- <b>Aerogenerador</b>	11
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>13</b>
<b>d.2. AEROGENERADORES</b>	<b>13</b>
d.2.1. Tipos de Turbinas eólicas	14
d.2.1.1 Rotores de eje vertical	14

-	<b>Rotores Darrieus</b>	15
-	<b>Rotores Savonius</b>	15
d.2.1.2	Rotores de eje horizontal	16
-	<b>Rotores multipala. Aeroturbinas lentas</b>	16
-	<b>Rotores tipo hélice. Aeroturbinas rápidas</b>	17
d.2.2.	Componentes básicos de un aerogenerador	19
d.2.2.1.	Transformación de energía. Rendimiento	23
d.2.3.	Rotor eólico	27
d.2.3.1.	Parámetros de diseño de rotores eólicos	30
-	Influencia del número de palas	32
-	Diseño óptimo de la pala. Factor de actividad	33
-	Valores de cuerda	35
	<b>Coefficiente de Solidez <math>\Omega</math>:</b>	35
-	Distribución de torsión	36
-	Tipo de perfil aerodinámico	37
	<b>NACA 4 dígitos</b>	39
d.2.3.2	Tecnología de palas	42
-	Geometría	42
-	Materiales. Características estructurales	45
-	Comparación de palas en el diseño de rotores eólicos	47
<b>CAPÍTULO III</b>		<b>48</b>
<b>d.3. AERODINÁMICA DE AEROTURBINAS</b>		<b>48</b>
d.3.1.	Teoría de Cantidad de Movimiento y Límite de Betz	48
d.3.2.	Teoría del Momento Cinético	58
d.3.3.	Teoría Turbillonaria	60
d.3.4.	Teoría del Elemento de Pala	61
d.3.5.	Perfiles Aerodinámicos	69
	Principio de Funcionamiento:	69
	Diseño:	70
d.3.6.	Diseño de Perfiles Aerodinámicos	80
d.3.6.1.	Métodos de diseño de perfiles aerodinámicos	80
•	<b>Diseño Directo</b>	81
•	<b>Diseño Inverso</b>	82
d.3.6.2.	Tipos de diseño de perfiles aerodinámicos	84



•	Diseño de perfiles con espesor máximo	84
•	Diseño de perfiles con sustentación máxima	84
•	Diseño de perfiles Laminares	85
•	Diseño de perfiles Transónicos	85
•	Diseño de perfiles para bajos números de Reynolds	86
•	Diseño de perfiles multipuntual	87
<b>CAPÍTULO IV</b>		<b>88</b>
<b>d. 4. HERRAMIENTAS DE DISEÑO, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		<b>88</b>
d.4.1.	DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)	88
d.4.2.	FABRICACIÓN ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM)	89
d.4.3.	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	90
d.4.4.	CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC)	92
d.4.4.1.	Máquinas CNC	94
d.4.4.1.1.	Fresadora CNC	95
d.4.4.2.	Códigos CNC	95
<b>e. MATERIALES Y MÉTODOS</b>		<b>96</b>
Materiales		96
Métodos		96
<b>f. RESULTADOS:</b>		<b>98</b>
1.	DISEÑO DEL PERFIL (CURVAS DEL PERFIL-Microsoft Excel)	98
2.	DISEÑO DEL MODELO DE PALA (CAD-SolidWorks)	109
3.	SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN DEL MODELO CON EL AIRE (CFD-Flow Simulation)	139
4.	ANÁLISIS ESTÁTICO Y DE FATIGA DEL MODELO (SolidWorks-Simulation)	161
4.1.	Análisis Estático	161
4.2.	Análisis de Fatiga	182
5.	SIMULACIÓN DEL MECANIZADO DEL MODELO Y GENERACIÓN DEL PROGRAMA CNC (CAM-SolidCAM)	192
6.	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO (Fresadora Travis M5 con CONTROL CNC FAGOR 8055M)	242
6.1.	DESCRIPCIÓN BREVE DEL EQUIPO	242

6.2.	ENCENDIDO DEL EQUIPO Y OPERACIONES DE RUTINA _____	244
-	Encendido: _____	244
-	Insertar posición actual del cambiador de herramientas _____	246
-	Búsqueda de cero máquina _____	250
6.3.	COLOCACIÓN DEL MATERIAL EN BRUTO _____	253
6.4.	DETERMINACIÓN DEL CERO PIEZA _____	254
6.5.	TRANSFERENCIA DE FICHEROS (PC-EQUIPO CNC) _____	260
6.6.	SIMULACIÓN DE PROGRAMAS _____	265
6.7.	EJECUCIÓN DE PROGRAMAS _____	268
6.8.	ELIMINACIÓN DE UN PROGRAMA _____	270
<b>g.</b>	<b>DISCUSIÓN _____</b>	<b>276</b>
<b>h.</b>	<b>CONCLUSIONES _____</b>	<b>280</b>
<b>i.</b>	<b>RECOMENDACIONES _____</b>	<b>281</b>
<b>j.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA _____</b>	<b>283</b>
<b>k.</b>	<b>ANEXOS _____</b>	<b>286</b>
<b>1.</b>	<b>HOJAS DE CÁLCULO PARA OBTENER EL PERFIL ALAR NACA 4415 _____</b>	<b>286</b>
1.1.	PERFIL ALAR EN FUNCIÓN DE LA CUERDA RAÍZ DE PALA _____	286
1.2.	PERFIL ALAR EN FUNCIÓN DE LA CUERDA PUNTA DE PALA _____	288
<b>2.</b>	<b>PLANO DEL MODELO DE PALA PARA TURBINA EÓLICA BASADA EN EL PERFIL NACA 4415</b>	<b>290</b>
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON CFD _____</b>	<b>292</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO _____</b>	<b>297</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FATIGA _____</b>	<b>304</b>
<b>6.</b>	<b>MECANIZADO DEL MODELO _____</b>	<b>309</b>
-	PRUEBAS DE MECANIZADO _____	309
-	MECANIZADO DEL MODELO FINAL _____	309
<b>7.</b>	<b>PROYECTO DE TESIS _____</b>	<b>310</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Figura 1. Aerogeneradores ubicados en altamar.</i>	7
<i>Figura 2. Molino de Viento</i>	10
<i>Figura 3. Multipala</i>	11
<i>Figura 4. Aerogenerador</i>	11
<i>Figura 5. Aerogenerador de eje horizontal.</i>	13
<i>Figura 6. Rotores de eje vertical (Darrieus arriba, Savonious debajo).</i>	16
<i>Figura 7. Rotor multipala americano.</i>	17
<i>Figura 8. Rotor de eje horizontal tipo hélice (monopala, bipala y tripala).</i>	18
<i>Figura 9. Disposición a sotavento y barlovento.</i>	19
<i>Figura 10. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica para diferentes tipos de rotores eólicos.</i>	19
<i>Figura 11. Componentes de un aerogenerador.</i>	21
<i>Figura 12. Componentes principales de un aerogenerador horizontal.</i>	22
<i>Figura 13. Coeficiente de potencia mecánico y eléctrico.</i>	26
<i>Figura 14. Rendimiento y flujo de potencia a plena carga de un aerogenerador de 1MW. (Los rendimientos incluidos son estimados)</i>	27
<i>Figura 15. Configuración general de turbinas de eje horizontal.</i>	28
<i>Figura 16. Influencia del número de palas sobre el coeficiente de potencia.</i>	33
<i>Figura 17. Factor de actividad en un diseño óptimo en función de la velocidad específica de diseño.</i>	34
<i>Figura 18. Influencia de la geometría de las palas en el coeficiente de potencia.</i>	34
<i>Figura 19. Relación entre el coeficiente de solidez y el TSR</i>	35
<i>Figura 20. Longitud útil de la pala.</i>	36
<i>Figura 21. Influencia de la ley de torsión de las palas en el coeficiente de potencia.</i>	37
<i>Figura 22. Influencia del rendimiento aerodinámico en el coeficiente de potencia.</i>	38
<i>Figura 23. Parámetros geométricos de un perfil NACA.</i>	38
<i>Figura 24. Construcción geométrica de un perfil NACA.</i>	41
<i>Figura 25. Forma geométrica de la punta de la pala.</i>	44
<i>Figura 26. Distribución de cuerdas, torsión y espesor relativo de una pala comercial LM-26.</i>	44
<i>Figura 27. Esquema del campo fluido usado para la obtención del límite de Betz y evolución resultante de las magnitudes fluidas.</i>	53
<i>Figura 28. Coeficiente de potencia de una aeroturbina por el modelo de cantidad de movimiento como función del parámetro de porosidad de <math>\alpha</math>.</i>	56
<i>Figura 29. Sistema de torbellinos desprendidos en punta y raíz de pala en turbinas de eje horizontal</i>	61
<i>Figura 30. Triángulo de velocidades de un elemento de pala situado a distancia <math>r</math> del eje.</i>	63

Figura 31. Composición de velocidades medias a tres radios. _____	64
Figura 32. Aumento del ángulo de incidencia al aumentar la velocidad del viento (dando lugar a un aumento de $v$ ) para una aeroturbina de paso fijo. _____	64
Figura 33. Coeficientes de potencia máximos para infinito número de palas como función de la rapidez local de la pala $\lambda(r)$ . _____	67
Figura 34. Coeficiente de potencia para aeroturbinas con distinto número de palas como función de la rapidez (coeficiente de velocidad) y para perfiles sin resistencia aerodinámica. _____	68
Figura 35. Distribución de presiones y esfuerzos cortantes sobre un perfil aerodinámico. _____	70
Figura 36. Esquema de la geometría de perfiles aerodinámicos subsónicos y $c_{max}$ =máximo de la coordenada de la línea de curvatura $t_{max}$ =espesor máximo. _____	72
Figura 37. Denominación habitual de los parámetros operativos básicos de perfiles aerodinámicos. _____	73
Figura 38. Esquema de la corriente adherida al perfil y desprendida por excesivo ángulo de ataque y los correspondientes puntos en las curvas de coeficientes de sustentación y resistencia. _____	75
Figura 39. Curvas polares de un perfil _____	78
Figura 40. Diagrama de flujo del diseño directo _____	81
Figura 41. Diagrama de flujo del diseño inverso _____	83
Figura 42. Ejemplo de una pieza diseñada con software CAD (SolidWorks). _____	88
Figura 43. Ejemplo de una pieza diseñada en CAD y transportada a un sistema CAM. _____	89
Figura 44. Objeto en un sistema CFD, simulando la interacción del aire con el mismo. _____	90
Figura 45. Fresadora CNC realizando el mecanizado de una pieza. _____	92
Figura 46. Hoja de cálculo. Inserción de las coordenadas $x$ . _____	100
Figura 47. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas de la línea de curvatura media. _____	101
Figura 48. Hoja de cálculo. Cálculo de la distribución de espesores. _____	101
Figura 49. Hoja de cálculo. Cálculo de los valores de pendiente de las rectas tangentes sucesivas a la curva media del perfil. _____	102
Figura 50. Hoja de cálculo. Cálculo del ángulo en función de los valores de pendiente. _____	103
Figura 51. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas ( $x$ ) para el extradós. _____	104
Figura 52. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas ( $x$ ) para el intradós. _____	104
Figura 53. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas ( $y$ ) del extradós. _____	104
Figura 54. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas ( $y$ ) del intradós. _____	105
Figura 55. Hoja de cálculo. Insertar gráfica de dispersión. _____	105
Figura 56. Hoja de cálculo. Selección de datos para la gráfica. _____	106
Figura 57. Hoja de cálculo. Seleccionar origen de datos para la gráfica. _____	106
Figura 58. Hoja de cálculo. Modificar serie para la gráfica de la curva del extradós. _____	107
Figura 59. Hoja de cálculo. Modificar serie para la gráfica de la curva media. _____	107

Figura 60. Hoja de cálculo. Modificar serie para la gráfica de la curva del intradós. _____	108
Figura 61. Hoja de cálculo. Gráficas de las curvas del perfil NACA 4415 en función de la cuerda raíz. ____	108
Figura 62. Inserción de nueva pestaña para la obtención de las curvas del perfil NACA 4415 en función de la cuerda punta de pala. _____	109
Figura 63. Hoja de cálculo. Gráficas de las curvas del perfil NACA 4415 en función de la cuerda punta de pala. _____	109
Figura 64. Obtención de los valores de coordenadas para inserción de curvas del perfil. _____	110
Figura 65. Opción de Pegado especial. _____	111
Figura 66. Pegado especial de valores de coordenadas. _____	111
Figura 67. Elaboración de tabla de coordenadas de curvas. _____	112
Figura 68. Aplicación del Factor de escala. _____	112
Figura 69. Obtención de los valores de coordenadas de las curvas, en mm. _____	113
Figura 70. Creación del archivo con extensión “.txt” con los valores de coordenadas de las curvas. ____	113
Figura 71. Valores de coordenadas en el archivo .txt _____	114
Figura 72. Creación de nuevo documento de pieza. _____	115
Figura 73. Inserción de Curva por puntos XYZ. _____	115
Figura 74. Inserción de archivo de curva. _____	116
Figura 75. Selección y apertura del archivo de coordenadas. _____	117
Figura 76. Inserción de coordenadas. _____	117
Figura 77. Inserción de la curva. _____	118
Figura 78. Inserción de las cuatro curvas de los perfiles. _____	118
Figura 79. Conversión de entidades. _____	119
Figura 80. Eliminación de relaciones. _____	119
Figura 81. Eliminación de relaciones. _____	120
Figura 82. Ocultar curvas. _____	121
Figura 83. Insertar Plano de referencia. _____	121
Figura 84. Insertar Plano de referencia. _____	122
Figura 85. Insertar Plano de referencia. _____	123
Figura 86. Plano de referencia insertado. _____	123
Figura 87. Traspaso de curvas al plano insertado. _____	124
Figura 88. Perfil completo en el plano insertado. _____	125
Figura 89. Eliminación de relaciones. _____	126
Figura 90. Perfiles finales. _____	127
Figura 91. Relación de perpendicularidad entre el borde de salida y los planos de los perfiles. _____	128
Figura 92. Operación Recubrir. _____	129

Figura 93. Modelo del sólido en base a los perfiles.	130
Figura 94. Inserción de un segundo plano de referencia.	131
Figura 95. Traslado de una superficie a un plano de referencia.	131
Figura 96. Traslado de una superficie a un plano de referencia.	132
Figura 97. Diseño de la raíz de la pala.	132
Figura 98. Base de la raíz de la pala.	133
Figura 99. Extrusión de la base de la raíz de la pala.	134
Figura 100. Base de la raíz de la pala.	134
Figura 101. Pala completa.	135
Figura 102. Redondeo del borde de ataque.	136
Figura 103. Redondeo del borde de ataque.	136
Figura 104. Redondeo de la punta de pala.	137
Figura 105. Modelo con redondeos finalizados.	137
Figura 106. Modelo con redondeos finalizados.	138
Figura 107. Modelo final en CAD.	138
Figura 108. Activando el complemento Flow Simulation	139
Figura 109. Activando el complemento Flow Simulation	140
Figura 110. Activando el complemento Flow Simulation	140
Figura 111. Definición de los parámetros de análisis	141
Figura 112. Configuración del proyecto	141
Figura 113. Sistema de Unidades	142
Figura 114. Tipo de Análisis	143
Figura 115. Tipo de fluido	143
Figura 116. Tipo de fluido	144
Figura 117. Condiciones de barrera	144
Figura 118. Condiciones iniciales y de ambiente	145
Figura 119. Condiciones iniciales y de ambiente	145
Figura 120. Resolución de resultados y de geometría	146
Figura 121. Dominio computacional	146
Figura 122. Dominio computacional	147
Figura 123. Dominio computacional	147
Figura 124. Dominio computacional	148
Figura 125. Dominio computacional	148
Figura 126. Ejecución del análisis CFD	149
Figura 127. Ejecución del análisis CFD	149

<i>Figura 128. Ejecución del análisis CFD</i>	150
<i>Figura 129. Ejecución del análisis CFD</i>	150
<i>Figura 130. Trayectorias de flujo</i>	151
<i>Figura 131. Trayectorias de flujo</i>	151
<i>Figura 132. Trayectorias de flujo</i>	152
<i>Figura 133. Trayectorias de flujo</i>	152
<i>Figura 134. Trayectorias de flujo</i>	153
<i>Figura 135. Trayectorias de flujo</i>	153
<i>Figura 136. Animación Trayectorias de flujo</i>	154
<i>Figura 137. Animación Trayectorias de flujo</i>	154
<i>Figura 138. Animación Trayectorias de flujo</i>	155
<i>Figura 139. Animación Trayectorias de flujo</i>	155
<i>Figura 140. Generación de reporte de resultados</i>	156
<i>Figura 141. Generación de reporte de resultados</i>	156
<i>Figura 142. Generación de reporte de resultados</i>	157
<i>Figura 143. Generación de reporte de resultados</i>	157
<i>Figura 144. Generación de reporte de resultados</i>	158
<i>Figura 145. Generación de reporte de resultados</i>	158
<i>Figura 146. Generación de reporte de resultados</i>	159
<i>Figura 147. Generación de reporte de resultados</i>	159
<i>Figura 148. Visualización de parámetros</i>	160
<i>Figura 149. Visualización de parámetros</i>	160
<i>Figura 150. Visualización de parámetros</i>	161
<i>Figura 151. Definir nuevo estudio</i>	162
<i>Figura 152. Definir Estudio Estático</i>	162
<i>Figura 153. Definir sujeciones</i>	163
<i>Figura 154. Definir sujeciones</i>	163
<i>Figura 155. Definir sujeciones</i>	164
<i>Figura 156. Definir cargas externas</i>	164
<i>Figura 157. Definir cargas externas</i>	165
<i>Figura 158. Definir cargas externas</i>	165
<i>Figura 159. Definir cargas externas</i>	166
<i>Figura 160. Definir cargas externas</i>	166
<i>Figura 161. Definir cargas externas</i>	167
<i>Figura 162. Definir cargas externas</i>	167



<i>Figura 163. Definir cargas externas</i>	168
<i>Figura 164. Definir cargas externas</i>	169
<i>Figura 165. Definir cargas externas</i>	169
<i>Figura 166. Excluir superficies de referencia</i>	170
<i>Figura 167. Crear Malla</i>	170
<i>Figura 168. Crear Malla</i>	171
<i>Figura 169. Crear Malla</i>	171
<i>Figura 170. Crear Malla</i>	172
<i>Figura 171. Crear Malla</i>	172
<i>Figura 172. Crear Malla</i>	173
<i>Figura 173. Aplicar material</i>	173
<i>Figura 174. Aplicar material</i>	174
<i>Figura 175. Ejecutar análisis</i>	174
<i>Figura 176. Ejecutar análisis</i>	175
<i>Figura 177. Resultados</i>	176
<i>Figura 178. Editar definición de resultados</i>	176
<i>Figura 179. Editar escala</i>	177
<i>Figura 180. Mostrar Resultados de Desplazamiento</i>	177
<i>Figura 181. Mostrar Resultados de Desplazamiento</i>	178
<i>Figura 182. Escala real de desplazamientos</i>	178
<i>Figura 183. Ejecutar animación</i>	179
<i>Figura 184. Ejecutar animación</i>	180
<i>Figura 185. Generar Informe de resultados</i>	180
<i>Figura 186. Generar informe de resultados</i>	180
<i>Figura 187. Proceso de generación de informe de resultados</i>	181
<i>Figura 188. Informe de resultados</i>	181
<i>Figura 189. Nuevo Estudio</i>	182
<i>Figura 190. Estudio de Fatiga</i>	183
<i>Figura 191. Agregar carga</i>	183
<i>Figura 192. Agregar carga</i>	184
<i>Figura 193. Aplicar datos de fatiga</i>	184
<i>Figura 194. Curvas SN de fatiga</i>	185
<i>Figura 195. Definir opciones de resultados</i>	186
<i>Figura 196. Definir opciones de resultados</i>	186
<i>Figura 197. Ejecutar análisis</i>	186

<i>Figura 198. Resultados de análisis</i>	187
<i>Figura 199. Mostrar resultados</i>	187
<i>Figura 200. Mostrar resultados</i>	188
<i>Figura 201. Editar opciones de gráfico</i>	188
<i>Figura 202. Editar opciones de gráfico</i>	189
<i>Figura 203. Editar opciones de gráfico</i>	189
<i>Figura 204. Mostrar resultados</i>	190
<i>Figura 205. Mostrar resultados</i>	191
<i>Figura 206. Mostrar resultados</i>	191
<i>Figura 207. Generación de informe de resultados</i>	191
<i>Figura 208. Informe de resultados</i>	192
<i>Figura 209. Creación del prisma que hace referencia al material en bruto.</i>	193
<i>Figura 210. Creación de un rectángulo.</i>	193
<i>Figura 211. Dimensionamiento del rectángulo</i>	194
<i>Figura 212. Rectángulo creado.</i>	194
<i>Figura 213. Extrusión del rectángulo.</i>	195
<i>Figura 214. Prisma rectangular creado.</i>	195
<i>Figura 215. Cambio de transparencia del prisma.</i>	196
<i>Figura 216. Prisma rectangular y modelo de pala.</i>	196
<i>Figura 217. Definición de los parámetros de partida para las operaciones de mecanizado.</i>	197
<i>Figura 218. Creación del archivo para las operaciones de mecanizado.</i>	198
<i>Figura 219. Selección de la máquina CNC.</i>	199
<i>Figura 220. Definir sistema de coordenadas.</i>	199
<i>Figura 221. Definir Sistema de coordenadas.</i>	200
<i>Figura 222. Definir Origen del sistema de coordenadas.</i>	200
<i>Figura 223. Definir dirección del eje X.</i>	201
<i>Figura 224. Definir dirección del eje Y.</i>	201
<i>Figura 225. Disposición final del sistema de coordenadas.</i>	202
<i>Figura 226. Datos finales del sistema de coordenadas.</i>	203
<i>Figura 227. Sistema de coordenadas completamente definido.</i>	203
<i>Figura 228. Definiendo la materia prima (Stock).</i>	204
<i>Figura 229. Seleccionando el modelo de materia prima,</i>	204
<i>Figura 230. Quitando la selección de ambos sólidos (Modelo de pala y Materia prima).</i>	205
<i>Figura 231. Selección del modelo de materia prima.</i>	205
<i>Figura 232. Definir Target (Modelo a mecanizar)</i>	206

<i>Figura 233. Definir Target.</i>	206
<i>Figura 234. Definir Target.</i>	207
<i>Figura 235. Definir Target.</i>	207
<i>Figura 236. Target definido.</i>	208
<i>Figura 237. Finalización de la definición de parámetros de partida.</i>	208
<i>Figura 238. Parámetros de partida definidos.</i>	209
<i>Figura 239. Definir Operaciones de Mecanizado.</i>	209
<i>Figura 240. Definir operación de desbaste (3D Milling).</i>	210
<i>Figura 241. Modificar Geometry</i>	210
<i>Figura 242. Definir Working Area</i>	211
<i>Figura 243. Definir Working Area</i>	211
<i>Figura 244. Definir Working Area</i>	212
<i>Figura 245. Definir Working Area</i>	212
<i>Figura 246. Definir puntos de Working Area</i>	213
<i>Figura 247. Definir puntos de Working Area.</i>	213
<i>Figura 248. Definir puntos de Working Area.</i>	214
<i>Figura 249. Definir puntos de Working Area</i>	214
<i>Figura 250. Confirmar Working Area</i>	215
<i>Figura 251. Working Area definida</i>	215
<i>Figura 252. Confirmar Working Area</i>	216
<i>Figura 253. Definir Tool.</i>	216
<i>Figura 254. Añadir Tool.</i>	217
<i>Figura 255. Definir tipo de fresa.</i>	217
<i>Figura 256. Modificación de características de fresa.</i>	218
<i>Figura 257. Herramienta definida.</i>	218
<i>Figura 258. Definir tipo de desbaste.</i>	219
<i>Figura 259. Contour definido.</i>	219
<i>Figura 260. Modificar valor Overlap.</i>	220
<i>Figura 261. Modificar valor de step down.</i>	220
<i>Figura 262. Modificar valor de Surface offset.</i>	221
<i>Figura 263. Guardar y Calcular operación.</i>	221
<i>Figura 264. Simulación del mecanizado.</i>	222
<i>Figura 265. Trayectorias de la herramienta en la operación de 3D Milling.</i>	222
<i>Figura 266. Generar código</i>	223
<i>Figura 267. Cabecera de programa predeterminada para control FANUC</i>	224

<i>Figura 268. Cabecera de programa para control FAGOR.</i>	224
<i>Figura 269. Modificación de F (velocidad de avance) y S (Velocidad de giro del husillo)</i>	225
<i>Figura 270. Reemplazar valores de F.</i>	225
<i>Figura 271. Modificación del parámetro F.</i>	226
<i>Figura 272. Guardar archivo de programa como archivo tipo PIM.</i>	227
<i>Figura 273. Modificación de la extensión del archivo de programa.</i>	227
<i>Figura 274. Definiendo la operación de acabado (HSM)</i>	228
<i>Figura 275. Seleccionar tipo de tecnología para la operación.</i>	228
<i>Figura 276. Escoger Herramienta</i>	229
<i>Figura 277. Escoger herramienta.</i>	229
<i>Figura 278. Determinar Passes.</i>	230
<i>Figura 279. Determinar Passes.</i>	230
<i>Figura 280. Guardando y calculando la operación de acabado.</i>	231
<i>Figura 281. Trayectorias de la herramienta para la operación de acabado (HSM).</i>	231
<i>Figura 282. Edición de líneas de programa que generan conflictos.</i>	232
<i>Figura 283. Edición de líneas de programa que generan conflictos.</i>	233
<i>Figura 284. Edición de líneas de programa que generan conflictos.</i>	233
<i>Figura 285. Edición de líneas de programa que generan conflictos.</i>	234
<i>Figura 286. Crear nuevo Milling (Fresado)</i>	234
<i>Figura 287. Guardar archivo SolidCAM.</i>	235
<i>Figura 288. Definir CNC-Machine.</i>	235
<i>Figura 289. Definir sistema de coordenadas.</i>	236
<i>Figura 290. Definir sistema de coordenadas.</i>	236
<i>Figura 291. Definir sistema de coordenadas</i>	237
<i>Figura 292. Definir sistema de coordenadas</i>	237
<i>Figura 293. Definir sistema de coordenadas</i>	238
<i>Figura 294. Definir sistema de coordenadas.</i>	238
<i>Figura 295. Definir sistema de coordenadas.</i>	239
<i>Figura 296. Definir sistema de coordenadas.</i>	239
<i>Figura 297. Definir sistema de coordenadas.</i>	240
<i>Figura 298. Definir sistema de coordenadas.</i>	240
<i>Figura 299. Definir sistema de coordenadas.</i>	241
<i>Figura 300. Vista Frontal</i>	242
<i>Figura 301. Vista lateral derecha</i>	243
<i>Figura 302. Vista lateral izquierda</i>	243

<i>Figura 303. Vista Frontal</i>	244
<i>Figura 304. Encender el equipo.</i>	244
<i>Figura 305. Encender el equipo.</i>	245
<i>Figura 306. Pantalla inicial del tablero de control.</i>	245
<i>Figura 307. Encender el equipo.</i>	246
<i>Figura 308. Encender el equipo.</i>	246
<i>Figura 309. Insertar posición actual de cambiador</i>	247
<i>Figura 310. Insertar posición actual de cambiador</i>	247
<i>Figura 311. Insertar posición actual de cambiador</i>	247
<i>Figura 312. Insertar posición actual de cambiador</i>	248
<i>Figura 313. Insertar posición actual de cambiador</i>	248
<i>Figura 314. Insertar posición actual de cambiador</i>	248
<i>Figura 315. Insertar posición actual de cambiador</i>	249
<i>Figura 316. Insertar posición actual de cambiador</i>	249
<i>Figura 317. Insertar posición actual de cambiador</i>	249
<i>Figura 318. Insertar posición actual de cambiador</i>	250
<i>Figura 319. Búsqueda de cero máquina.</i>	250
<i>Figura 320. Búsqueda de cero máquina.</i>	250
<i>Figura 321. Búsqueda de cero máquina.</i>	251
<i>Figura 322. Búsqueda de cero máquina.</i>	251
<i>Figura 323. Búsqueda de cero máquina.</i>	251
<i>Figura 324. Búsqueda de cero máquina.</i>	252
<i>Figura 325. Búsqueda de cero máquina.</i>	252
<i>Figura 326. Búsqueda de cero máquina.</i>	252
<i>Figura 327. Ubicando material en bruto.</i>	253
<i>Figura 328. Referencias de ubicación.</i>	253
<i>Figura 329. Referencias de ubicación.</i>	254
<i>Figura 330. Definir cero pieza.</i>	254
<i>Figura 331. Definir cero pieza.</i>	255
<i>Figura 332. Definir cero pieza.</i>	255
<i>Figura 333. Definir cero pieza.</i>	256
<i>Figura 334. Definir cero pieza.</i>	256
<i>Figura 335. Definir cero pieza.</i>	257
<i>Figura 336. Definir cero pieza.</i>	257
<i>Figura 337. Definir cero pieza.</i>	258

<i>Figura 338. Definir cero pieza.</i>	258
<i>Figura 339. Definir cero pieza.</i>	258
<i>Figura 340. Definir cero pieza.</i>	259
<i>Figura 341. Definir cero pieza.</i>	259
<i>Figura 342. Definir cero pieza.</i>	259
<i>Figura 343. Definir cero pieza.</i>	260
<i>Figura 344. Transferencia de ficheros.</i>	260
<i>Figura 345. Transferencia de ficheros.</i>	261
<i>Figura 346. Transferencia de ficheros.</i>	262
<i>Figura 347. Transferencia de ficheros.</i>	262
<i>Figura 348. Transferencia de ficheros.</i>	263
<i>Figura 349. Transferencia de ficheros.</i>	264
<i>Figura 350. Transferencia de ficheros.</i>	264
<i>Figura 351. Simulación de programas</i>	265
<i>Figura 352. Simulación de programas</i>	265
<i>Figura 353. Simulación de programas</i>	266
<i>Figura 354. Simulación de programas</i>	266
<i>Figura 355. Simulación de programas</i>	266
<i>Figura 356. Simulación de programas</i>	267
<i>Figura 357. Simulación de programas</i>	267
<i>Figura 358. Simulación de programas</i>	268
<i>Figura 359. Ejecución de programas</i>	268
<i>Figura 360. Ejecución de programas</i>	269
<i>Figura 361. Ejecución de programas</i>	269
<i>Figura 362. Ejecución de programas</i>	269
<i>Figura 363. Ejecución de programas</i>	270
<i>Figura 364. Ejecución de programas</i>	270
<i>Figura 365. Eliminación de un programa</i>	271
<i>Figura 366. Eliminación de un programa</i>	271
<i>Figura 367. Eliminación de un programa</i>	271
<i>Figura 368. Eliminación de un programa</i>	272
<i>Figura 369. Eliminación de un programa</i>	272
<i>Figura 370. Eliminación de un programa</i>	273
<i>Figura 371. Eliminación de un programa</i>	273
<i>Figura 372. Giro del material en bruto y ejecución del mecanizado de la parte inferior del modelo</i>	274

<i>Figura 373. Giro del material en bruto y ejecución del mecanizado de la parte inferior del modelo</i>	_____	274
<i>Figura 374. Giro del material en bruto y ejecución del mecanizado de la parte inferior del modelo</i>	_____	274
<i>Figura 375. Giro del material en bruto y ejecución del mecanizado de la parte inferior del modelo</i>	_____	275
<i>Figura 376. Modelo final en madera.</i>	_____	275

## **ÍNDICE DE TABLAS**

<i>Tabla 1. Velocidad específica o periférica para máquinas de viento de eje horizontal.</i>	_____	35
<i>Tabla 2. Características geométricas de palas.</i>	_____	43
<i>Tabla 3. Características de los materiales empleados en la fabricación de palas de aerogeneradores.</i>	_____	47
<i>Tabla 4. Valores típicos del número de palas como función de la rapidez de las turbinas.</i>	_____	65
<i>Tabla 5. Ejemplos de códigos CNC.</i>	_____	95



## SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	DENOMINACIÓN
$\rho$	Densidad
$P_w$	Potencia del viento
$P_{m,b}$	Potencia mecánica en el eje de baja velocidad
$P_{m,a}$	Potencia mecánica en el eje de alta velocidad
$\beta$	Ángulo de paso de palas
$\lambda$	Coefficiente de velocidad específica
$C_{p,m}$	Coefficiente de potencia mecánica
$C_{p,e}$	Coefficiente de potencia eléctrica
$C_p$	Coefficiente de potencia
$C_D, C_T$	Coefficiente de resistencia a la tracción
$\eta_{m1}$	Rendimiento de los cojinetes y cierres de contacto en el eje
$\eta_{m2}$	Rendimiento de la caja multiplicadora
$A$	Área barrida por las palas
$v$	velocidad
$\theta_{tor}$	Ángulo de torsión
$D$	Diámetro del rotor
$N$	Número de palas
$r$	Radio de la pala
$L/D$	Rendimiento aerodinámico
$\mu$	Viscosidad
$Re$	Número de Reynolds
$AF$	Factor de Actividad
$TSR$	Relación de velocidad específica
$\Omega$	Coefficiente de solidez
$A_p$	Área ocupada por las palas
$\bar{c}$	Cuerda media

$c$	Cuerda del perfil
$c_{pp}$	Cuerda en la punta de la pala
$c_{raíz}$	Cuerda en la raíz de la pala
$d/c$	Espesor relativo
$d$	Espesor máximo
$x_d$	Posición del máximo espesor
$x_f$	Posición de la curvatura máxima
$y_{o(x)}$	Coordenadas del extradós
$y_{u(x)}$	Coordenadas del intradós
$y_c$	Línea de curvatura media
$y_t$	Distribución de espesores
$t/c$	Máxima curvatura
$f$	Flecha máxima (Curvatura máxima)
$r_N$	radio de la nariz
$\theta$	Ángulo entre tangentes a la línea de curvatura media, con la cuerda
$E$	Módulo de elasticidad
$\sigma_u$	Límite elástico
$\sigma_A$	Resistencia a la fatiga
$m_p$	Masa de la pala
$p_t$	Presión total
$M$	Número de Mach
$\dot{m}$	Flujo másico
$m$	Curvatura máxima del perfil NACA
$p$	posición de la curvatura máxima del perfil NACA
$t$	Espesor máximo
$\alpha_o$	Ángulo de sustentación nula
$\alpha$	Ángulo de ataque
$\phi$	Ángulo de la corriente de aire respecto al plano de giro del rotor

**a. TÍTULO**

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PALAS DE TURBINAS  
EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL DE RADIO MÁXIMO 80cm BASADOS EN  
PERFILES ALARES NACA, APLICANDO TECNOLOGÍA CAD-CAM-CNC

## **b. RESUMEN**

El objetivo principal del presente trabajo de investigación fue el de elaborar una metodología, tanto de diseño como construcción de palas para turbinas eólicas basada en perfiles NACA, mediante la utilización de tecnología de Diseño Asistido por Computadora (CAD), Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Fabricación Asistida por Computadora (CAM) y Control Numérico Computarizado (CNC), debido a que en nuestro medio no existen estudios de carácter local que permitan o incentiven el aprovechamiento de recursos energéticos, específicamente los eólicos.

Así pues, se expone la obtención de las curvas del perfil, tanto en la raíz como en la cuerda de la pala; la determinación de parámetros geométricos del modelo; el diseño del modelo utilizando un software CAD; el análisis del modelo en interacción con el viento utilizando software CFD; el análisis estático y de fatiga del modelo en base a cargas originadas por el flujo; la determinación de operaciones de mecanizado y la simulación de las mismas, así como la obtención de la programación CNC utilizando software CAM y la construcción del modelo de pala utilizando una Fresadora con control numérico computarizado (CNC).

Al final se concluye que el diseño del modelo de pala para turbinas eólicas basado en un perfil alar NACA, cumple con los requerimientos necesarios para ser utilizado en un rotor de turbina eólica.

## **Summary**

The main objective of this research was to develop a methodology , both design and construction of wind turbine blades based on NACA profiles , technology using Computer Aided Design (CAD ) , Computational Fluid Dynamics (CFD ) , Computer Aided Manufacturing ( CAM ) and Computer Numerical Control (CNC ) , because in our country there are no local studies that allow or encourage the use of energy resources, specifically the wind .

Thus exposed obtaining profile curves, both at the root and in the blade chord; determining geometric parameters of the model, the model design using a CAD software, analysis of the interaction model wind using CFD software, the static and fatigue analysis model based on loads originating from the flow, the determination of machining operations and the simulation thereof, and obtaining CNC programming using CAM software and construction of blade model using a milling machine computer numerical control (CNC).

Ultimately conclude that the pattern design based wind turbine blade to a NACA airfoil meets the requirements for use in a wind turbine rotor.

### **c. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, la Energía Eléctrica es la forma de energía más utilizada a nivel mundial. Debido a que esta puede ser transformada en otras formas de energía como mecánica, luminosa, térmica, tiene una infinidad de aplicaciones a nivel doméstico, en el uso de electrodomésticos o artefactos de bajo consumo; a nivel industrial, en fábricas de calzado, alimentos, muebles, etc.; en el alumbrado público de ciudades, y así en un sinnúmero de actividades que sin la energía eléctrica no se podrían realizar.

Para disponer de la energía eléctrica, ésta primero debe seguir una etapa de generación, luego de transporte y finalmente de distribución.

En la fase de generación de energía eléctrica, primeramente se debe aprovechar un tipo de energía primaria con el medio apropiado, por ejemplo: Para aprovechar la energía química de un combustible, se utilizan potentes motores acoplados a generadores de energía eléctrica; la energía solar es captada por paneles fotovoltaicos; la energía hidráulica es absorbida por turbinas, al igual que la energía eólica.

Hoy en día la conservación del medio ambiente es un factor muy importante, por esta razón existe una tendencia de apostar por la generación de electricidad a través de energías alternativas o renovables, es decir generar electricidad de manera que el impacto ambiental sea mínimo.

Así es el caso de la energía eólica que aprovecha la energía cinética del viento para generar electricidad. El medio para aprovechar esta energía primaria son las turbinas eólicas. Existe una variedad de turbinas eólicas, dependiendo de la aplicación y diseño de las mismas.

El diseño de turbinas eólicas ha ido evolucionando, y actualmente se siguen creando nuevos diseños, de manera que pueda aprovecharse en mayor parte la energía del viento. Un punto muy importante en el diseño de turbinas eólicas es el perfil de la pala, ya que este influye directamente en la eficiencia de la turbina. Existe una gran variedad de perfiles comerciales, y además existen perfiles alares utilizados en la aviación que son aplicados en el diseño de turbinas eólicas, tal es el caso de los perfiles NACA (Comité Consultivo

Nacional para la Aeronáutica de los Estados Unidos), los cuales dependiendo de la serie ofrecen diferentes formas de perfil.

## **SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

En nuestro medio la falta de tecnología para el diseño y procesos de construcción, nos obliga a importar de países desarrollados, esto impide que se generen plazas de trabajo, y que se invierta en nuestro país.

En concreto al referirse al diseño y construcción de turbinas ya sea tipo eólico, hidráulico o de vapor, en nuestro país es poca la investigación que se realiza. En la ciudad de Loja, no existen empresas, centros de investigación y desarrollo que generen una metodología para el diseño de estos elementos, y por ende tampoco su construcción.

Adicionalmente, se puede mencionar que las características de nuestra región, son óptimas para proyectos destinados a aprovechar los recursos eólicos, tal es el caso del sector Villonaco, el cual principalmente por su altura (2720m) y velocidad de viento (12 m/s), tiene una de las mejores potencialidades en cuanto a energía eólica en Latinoamérica.

Existen perfiles de alas para avión, que pueden ser aplicados para la construcción de palas de turbinas de aerogeneradores, tal es el caso de los perfiles alares desarrollados por el departamento estadounidense NACA (Comité Consultivo Nacional para la Aeronáutica). La importancia de estos es que de acuerdo a su número de serie, se puede tener el perfil geométrico de una manera práctica, esto simplifica los análisis de diseño mecánico para determinar dicho perfil.

## **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

El problema de investigación que se ha planteado es el siguiente:

**No existe un proceso metodológico en cuanto al diseño o construcción de palas para aerogeneradores que permitan aprovechar los recursos eólicos de la ciudad de Loja.**



## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

Elaborar una metodología para el diseño y construcción de palas de aerogeneradores de eje horizontal tipo NACA 4415 de 80cm de radio máximo, utilizando tecnología CAD-CAM-CNC.

### **Objetivos específicos:**

- Sistematizar la información sobre la aplicación de perfiles tipo NACA.
- Diseñar una pala para turbinas eólicas de eje horizontal, utilizando el perfil tipo NACA 4415, bajo criterios de diseño asistido por computadora (CAD).
- Aplicar una prueba de interacción del modelo con el aire, utilizando software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y construir el modelo.
- Elaborar un algoritmo metodológico para la construcción de la pala mencionada, mediante tecnología CAM-CNC.

## d. REVISIÓN DE LITERATURA

### CAPÍTULO I

#### d.1. ENERGÍA EÓLICA



Figura 1. Aerogeneradores ubicados en altamar.  
Fuente: wikipedia.org

Según Escudero López [1], la energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transmutada en otras formas útiles para las actividades humanas.

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. A finales de 2011, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 238 GW. En 2011 la energía eólica generó alrededor del 3% del consumo de electricidad mundial. En España la energía eólica produjo un 16% del consumo eléctrico en 2011. El 19 de abril de 2012, la energía eólica alcanzó el 61,06% de la electricidad producida en España, con una potencia instantánea de 14.889MW respecto a los 24.384MW demandados por la red eléctrica.

La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde. Sin embargo, el principal inconveniente es su intermitencia.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Los vientos son generados a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar, entre el 1% y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento. De día, las masas de aire sobre los océanos, los mares y los lagos se mantienen frías con relación a las áreas vecinas situadas sobre las masas continentales.

Los continentes absorben una menor cantidad de luz solar, por lo tanto el aire que se encuentra sobre la tierra se expande, y se hace por lo tanto más liviano y se eleva. El aire más frío y más pesado que proviene de los mares, océanos y grandes lagos se pone en movimiento para ocupar el lugar dejado por el aire caliente.

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la cantidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "cut-in speed", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada "cut-out speed".

La energía del viento es utilizada mediante el uso de máquinas eólicas (o aeromotores) capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación utilizable, ya sea para accionar directamente las máquinas operatrices, como para la producción de energía eléctrica. En este último caso, el sistema de conversión, (que comprende un generador eléctrico con sus sistemas de control y de conexión a la red) es conocido como aerogenerador.

En la actualidad se utiliza, sobre todo, para mover aerogeneradores. En estos la energía eólica mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que produce energía eléctrica. Para que su instalación resulte rentable, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos.

La energía eólica no es algo nuevo, es una de las energías más antiguas junto a la energía térmica. El viento como fuerza motriz existe desde la antigüedad y en todos los tiempos ha sido utilizado como tal, como podemos observar. Tiene su origen en el sol. Así, ha movido a barcos impulsados por velas o ha hecho funcionar la maquinaria de los molinos al mover sus aspas. Pero, fue a partir de los ochenta del siglo pasado, cuando este tipo de energía limpia sufrió un verdadero impulso. La energía eólica crece de forma imparable a partir del siglo XXI, en algunos países más que en otros.

A través del tiempo, los medios para aprovechar la energía eólica y las aplicaciones de la misma han ido sufriendo cambios. En el principio era utilizada para mover grandes molinos, luego se usó para el bombeo de agua, y conforme se desarrolló la energía eléctrica, se empezaron a diseñar turbinas eólicas, las turbinas modernas fueron desarrolladas a comienzos de 1980, si bien, los diseños continúan desarrollándose.

#### **d.1.1. Turbinas Eólicas**

Gipe [2] establece que una turbina es el nombre genérico que se da a la mayoría de las turbomáquinas motoras. Éstas son máquinas de fluido, a través de las cuales pasa un fluido en forma continua y éste le entrega su energía a través de un rodete con paletas o álabes.

Es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de aire. El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento a una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice.

Las turbinas constan de una o dos ruedas con paletas, denominadas rotor, el rotor, impulsado por el fluido arrastra el eje en el que se obtiene el movimiento de rotación.

Hasta el momento, la turbina es uno de los motores más eficientes que existen (alrededor del 50%) con respecto a los motores de combustión interna y hasta algunos eléctricos.

Una turbina eólica o turbina de viento es una turbina accionada por la energía eólica. Se trata de una turbomáquina motora que intercambia cantidad de movimiento con el viento, haciendo girar un rotor. La energía mecánica del eje del rotor puede ser aprovechada para diversas aplicaciones como moler, en el caso de los molinos de viento; bombear agua, en el caso de las aerobombas; o para la generación de energía eléctrica, en los aerogeneradores.

Las turbinas eólicas se clasifican, según la orientación del eje del rotor, en verticales y horizontales.

#### **d.1.1.1. Turbinas Eólicas tipo horizontal**

Como su nombre lo indica, el eje de rotación es horizontal, por lo cual el plano de rotación de las palas es perpendicular a la superficie en donde las turbinas están situadas.

Tipos:

##### **- Molino de viento**

Los molinos de viento son estructuras bajas, generalmente de cuatro aspas, que se construyeron en Europa a partir del siglo XII.



Figura 2. Molino de Viento  
Fuente: wikipedia.org

##### **- Multipala**

El molino multipala se utiliza para bombear agua y fue de enorme utilidad en el siglo XIX. Estos molinos contribuyeron a la expansión del ferrocarril alrededor del mundo, supliendo las necesidades de agua de las locomotoras a vapor.

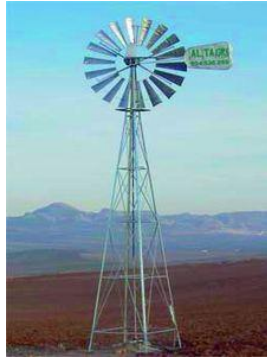


Figura 3. Multipala  
Fuente: wikipedia.org

### - Aerogenerador

Las turbinas eólicas modernas, conocidas también como aerogeneradores tienen su origen en Dinamarca en la década de 1980. Hoy en día la industria eólica utiliza generadores con rotores de hasta 126 metros de diámetro fabricados con alta tecnología. Son usadas en parques eólicos para la producción comercial de electricidad. La gran mayoría tiene tres palas, están pintadas de un tono claro, tienen una eficiencia alta y están controladas por computadora.



Figura 4. Aerogenerador  
Fuente: wikipedia.org

## **Ventajas y Desventajas**

### **▪ Ventajas**

Extremos de pala variable, lo que da a las hojas el ángulo de ataque óptimo. Permitir que el ángulo de ataque sea vagamente ajustado proporciona gran control, de modo que la turbina puede recoger la máxima cantidad de energía eólica de cada día y estación.

Las torres altas permiten acceder a vientos más fuertes en sitios con cizalladura. En algunos lugares, cada 10 metros de altura, la velocidad del viento se incrementa un 20%.

### **▪ Desventajas**

Las turbinas horizontales tienen problemas para funcionar cerca del suelo, debido a las turbulencias.

Las torres altas y las palas largas son difíciles de transportar. El transporte puede costar un 20% del costo de equipamiento.

Las turbinas altas son difíciles de instalar y necesitan grúas poderosas y operadores hábiles.

Las turbinas altas pueden afectar los radares de los aeropuertos.

Presentan impacto visual en el entorno, y con frecuencia suscitan reclamaciones por afeamiento del paisaje.

Exigen un control cuidadoso, de lo contrario, son propensas a la fatiga de material y los daños estructurales.

Tienen que orientarse hacia el viento.

## CAPÍTULO II

### d.2. AEROGENERADORES



Figura 5. Aerogenerador de eje horizontal.  
Fuente: wikipedia.org

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.

Ya en la primera mitad del siglo XX, la generación de energía eléctrica con rotores eólicos fue bastante popular en casas aisladas situadas en zonas rurales.



En Europa se distingue claramente un modelo centro-europeo, donde los aerogeneradores llegan a ubicarse en pequeñas agrupaciones en las cercanías de las ciudades alemanas, danesas, neerlandesas, y un modelo español, donde los aerogeneradores forman agrupaciones (a veces de gran tamaño) en las zonas montañosas donde el viento es frecuente, normalmente alejadas de los núcleos de población.

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado la viabilidad industrial, y nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

Han sido muchas las turbinas que se han diseñado para aprovechar la energía del viento, sin embargo, la tecnología de aerogeneradores para producción de energía eléctrica ha evolucionado hacia máquinas de tres palas, orientadas a barlovento, con torre tubular y sistemas de orientación activos. Estas características se pueden considerar comunes en los aerogeneradores actuales, sin embargo existen diferencias significativas en aspectos relativos al tipo de generador eléctrico y los sistemas de control del aerogenerador.

#### **d.2.1. Tipos de Turbinas eólicas**

Una primera clasificación de las turbinas eólicas se puede realizar atendiendo al tipo de rotor eólico y la disposición de su eje de giro. Así las turbinas se clasifican en turbinas con rotor de eje vertical y turbinas con rotor de eje horizontal.

##### **d.2.1.1 Rotores de eje vertical**

Las turbinas con rotores de eje vertical tienen la ventaja fundamental de que no precisan ningún sistema de orientación activo para captar la energía contenida en el viento. Presentan la ventaja añadida, con respecto a las turbinas de eje horizontal, de disponer el tren de potencia, el generador eléctrico y los sistemas de control a nivel del suelo. Los diseños más conocidos de eje vertical son los rotores tipo Darrieus y los rotores tipo Savonius.

### - **Rotores Darrieus**

Las aeroturbinas de eje vertical tipo Darrieus, deben su nombre a una patente americana de 1931 por el ingeniero G.J.M. Darrieus, consta de dos o más palas dispuestas como la forma que toma una cuerda sujeta por sus extremos y sometida a un movimiento giratorio, Figura 6. Su rendimiento y velocidad de giro son comparables a las aeroturbinas de eje horizontal, sin embargo presenta algunas desventajas como son: ausencia de par de arranque, lo que hace necesario motorizar la turbina para que comience a girar y empleo de tensores adicionales para garantizar la estabilidad estructural de la máquina. Además cada una de las palas de este tipo de máquinas está sometida a fluctuaciones de par elevadas debido al efecto de sombra de torre.

A pesar de estos inconvenientes se llegaron a desarrollar a finales de los años 80 prototipos de 625 KW de potencia y 34m de diámetro en los laboratorios Sandia/DOE. De manera comercial se instalaron máquinas comerciales tipo Darrieus de 17m de diámetro y 170KW comercializadas por la empresa Flowind en la zona californiana de Altamont Pass.

### - **Rotores Savonius**

Otro tipo de turbina de eje vertical desarrollada en Finlandia por S.J. Savonius, es la turbina que lleva su nombre. Se caracteriza por disponer de dos palas que son las mitades de un cilindro cortadas por una generatriz y desplazadas lateralmente. Tienen la ventaja de ofrecer par de arranque y se pueden construir fácilmente, pero su bajo rendimiento y su reducida velocidad de giro hacen que sus aplicaciones se limiten a bombeo de pistón. No obstante se han desarrollado prototipos de 5KW para aplicaciones de producción de electricidad en sistemas aislados como el Kansas State University Savonius.

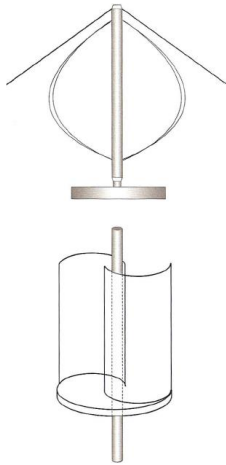


Figura 6. Rotores de eje vertical (Darrieus arriba, Savonius debajo).  
Fuente: Arias Vega, 2006

### **d.2.1.2 Rotores de eje horizontal**

Los rotores de eje horizontal se caracterizan porque giran sus palas en dirección perpendicular a la velocidad del viento incidente. La velocidad de giro de las turbinas de eje horizontal sigue una relación inversa al número de sus palas, o de forma más precisa al parámetro denominado solidez que indica el cociente entre la superficie ocupada por las palas y la superficie barrida por ellas. Así, las turbinas de eje horizontal se clasifican en turbinas de rotor multipala o aeroturbinas lentas y rotor tipo hélice o aeroturbinas rápidas. Las características básicas y aplicaciones de los dos tipos de turbinas se indican a continuación.

#### **- Rotores multipala. Aeroturbinas lentas**

Los rotores multipala se caracterizan por tener un número de palas que puede variar de 6 a 24 y por lo tanto una solidez elevada. Presentan elevados pares de arranque y una reducida velocidad de giro. La velocidad lineal en la punta de la pala de estas máquinas en condiciones de diseño, es del mismo orden que la velocidad del viento incidente. Estas características hacen que la aplicación fundamental de estas turbinas haya sido tradicionalmente el bombeo de agua. No se utilizan en aplicaciones de generación de energía eléctrica debido a su bajo régimen de giro.

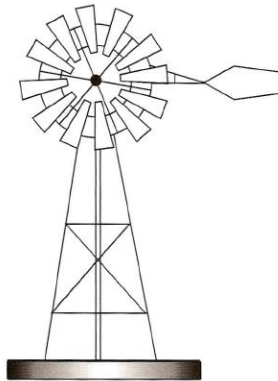


Figura 7. Rotor multipala americano.  
Fuente: Arias Vega, 2006

### - **Rotores tipo hélice. Aeroturbinas rápidas**

Los rotores tipo hélice giran a una velocidad mayor que los rotores multipala. La velocidad lineal en la punta de la pala de estas máquinas varía en un margen de 6 a 14 veces la velocidad del viento incidente en condiciones de diseño. Esta propiedad hace que las aeroturbinas rápidas sean muy apropiadas para la generación de energía eléctrica, ya que el elemento mecánico que acondiciona la velocidad de giro de la turbina con la velocidad de giro del generador es menor en tamaño y coste. Los rotores tipo hélice presentan un par de arranque reducido que, en la mayoría de las aplicaciones es suficiente para hacer girar el rotor durante el proceso de conexión.

Dentro de los rotores tipo hélice los más utilizados son los de tres palas, debido fundamentalmente a su mejor estabilidad estructural y aerodinámica, menor emisión de ruido y mayor rendimiento energético frente a los rotores de una o dos palas. La ventaja fundamental de estos últimos, es que la velocidad de giro de diseño es superior y por lo tanto la relación de multiplicación de la caja de transmisión es más reducida. Además, presentan como ventajas adicionales: reducción en el coste de la instalación al emplear menor número de palas y una fácil instalación; ya que pueden ser izados sin giros complicados tras su montaje en el suelo como pieza única.

Otra clasificación adicional que se puede realizar con los aerogeneradores que utilizan rotores tipo hélice, es la disposición de las palas respecto al viento incidente. Así, las turbinas pueden diseñarse para que funcionen en la configuración de barlovento o

sotavento. Las máquinas en posición de barlovento necesitan un sistema de orientación activo ya que la velocidad del viento inicialmente incide sobre el rotor eólico y posteriormente sobre la torre. Por el contrario, las máquinas orientadas a sotavento utilizan un sistema de orientación pasivo que se basa en inclinar ligeramente las palas como se indica en la Figura 9., de forma que en su movimiento de rotación describen un cono. Cuando el rotor no está orientado, las palas que se encuentran más a favor del viento reciben un empuje aerodinámico que tiende a variar la orientación del rotor hacia la posición de equilibrio.

A pesar de utilizar un sistema de orientación activo, la configuración a barlovento es la opción elegida por la mayoría de fabricantes debido a las elevadas cargas aerodinámicas que aparecen sobre la máquina cuando la disposición es a sotavento. En esta configuración, cuando la pala pasa por la zona de influencia de la torre no recibe viento y por lo tanto no transmite par aerodinámico, lo que da lugar a fluctuaciones de potencia y fatiga en los materiales. Por otra parte, esta disposición hace que durante la orientación se generen esfuerzos transitorios elevados ya que el proceso de giro del rotor eólico no está controlado.

En la Figura 10., se representa el coeficiente de potencia en función de la velocidad específica de las diferentes turbinas estudiadas en este apartado.

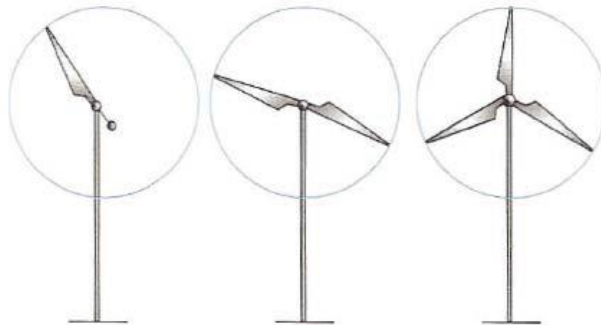


Figura 8. Rotor de eje horizontal tipo hélice (monopala, bipala y tripala).  
Fuente: Arias Vega, 2006

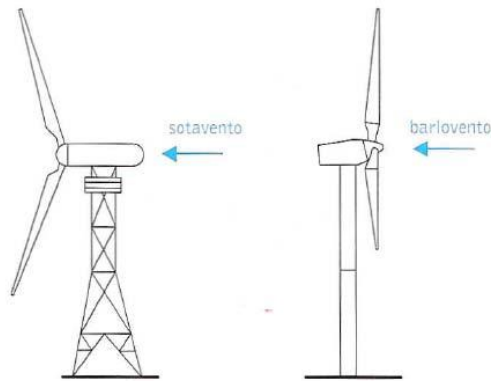


Figura 9. Disposición a sotavento y barlovento.  
Fuente: Arias Vega, 2006

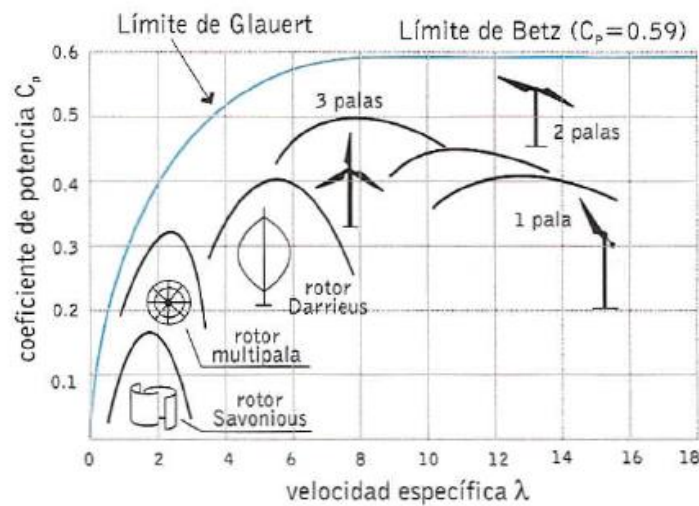


Figura 10. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica para diferentes tipos de rotores eólicos.  
Fuente: Arias Vega, 2006

### d.2.2. Componentes básicos de un aerogenerador

Existe una variedad muy grande en cuanto al tipo de turbinas empleadas para aprovechar la energía del viento y transformarla en energía eléctrica. Sin embargo, la tecnología actual de aerogeneradores ha evolucionado hacia máquinas de eje horizontal, de tres palas, orientadas a barlovento y con torre tubular. Se podría decir que ésta es la configuración básica que ofrecen la gran mayoría de fabricantes.

Para entender la necesidad de todos los sistemas que componen un moderno aerogenerador, es importante hacer notar cuál es el principio de funcionamiento de estos sistemas y cómo es el proceso de conversión de la energía que se produce en ellos.

Cuando la velocidad del viento que incide sobre un aerogenerador aumenta, lo hacen también las fuerzas que se producen sobre las palas. Estas fuerzas desarrollan par mecánico y esfuerzos sobre los elementos mecánicos del aerogenerador. El par mecánico desarrollado por la turbina, cuando está girando a una determinada velocidad, produce una potencia mecánica que se transmite al generador y se convierte finalmente en energía eléctrica. En este proceso de conversión de energía intervienen fundamentalmente: el rotor eólico que es el elemento que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, el tren de potencia que transmite la energía mecánica desarrollada por la turbina al generador eléctrico mediante una caja de multiplicación de la velocidad, y por último el generador eléctrico que es el dispositivo encargado de transformar la energía mecánica en eléctrica. Algunos sistemas disponen, entre el generador y la red eléctrica, de convertidores electrónicos cuya función es por una parte controlar la velocidad de giro del generador y por otra acondicionar la energía eléctrica generada.

Durante el proceso de conexión, si el aerogenerador dispone de un sistema de control de cambio de paso de pala, se optimiza el ángulo de calado de las palas con el fin de controlar la aceleración del rotor eólico. Una vez que el sistema se ha conectado a la red, la velocidad de giro se mantiene constante o prácticamente constante, ya que ésta depende de la frecuencia de la red, supuesta constante, y de características constructivas del generador. Esto ocurre en los sistemas denominados de velocidad fija, que carecen de convertidores electrónicos entre el generador y la red. Estos dispositivos permiten desacoplar la frecuencia de funcionamiento del generador con la frecuencia de la red, haciendo que puedan funcionar a velocidad variable.

Los procesos descritos anteriormente, corresponden a la transformación de energía que se produce en el sistema, sin embargo cuando la velocidad del viento incide sobre el aerogenerador se producen esfuerzos sobre los elementos mecánicos (palas, torre y transmisión mecánica) que desgastan o fatigan los componentes y reducen lo que se denomina vida útil del aerogenerador. Este aspecto es de vital importancia, ya que el diseño de un aerogenerador actual debe garantizar una vida útil de sus componentes en un periodo de 20 años. Esto hace que la misión de algunos de los sistemas que incorporan los

aerogeneradores sea reducir los esfuerzos mecánicos. Así por ejemplo, cuando la velocidad del viento supera la velocidad nominal, algunas tecnologías emplean el control por cambio de paso de las palas para limitar la potencia mecánica sobre el rotor eólico y la velocidad de giro en el caso que el sistema sea de velocidad variable.

En la Figura 11., se representan los diferentes sistemas que se incorporan en los modernos aerogeneradores. No todas las tecnologías disponen de la totalidad de estos sistemas. Algunos fabricantes han apostado por máquinas robustas y muy sencillas de concepto que no incorporan sistemas aerodinámicos de limitación de potencia ni convertidores electrónicos para variar la velocidad de giro del generador.

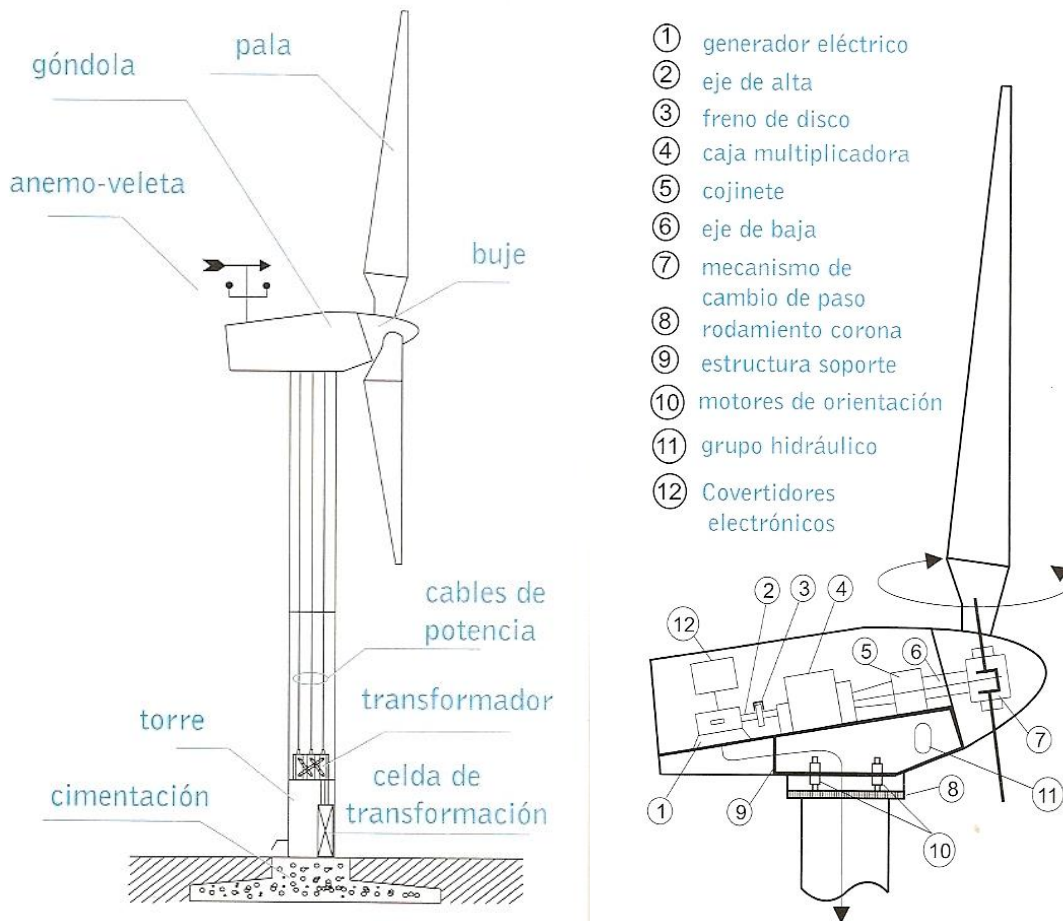


Figura 11. Componentes de un aerogenerador.  
Fuente: Arias Vega, 2006

A continuación, se expone un poco más detallado el sistema de un aerogenerador.



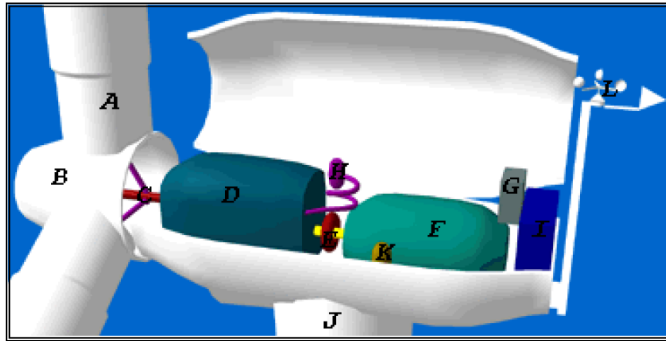


Figura 12. Componentes principales de un aerogenerador horizontal.  
Fuente: Arias Vega, 2006

La Góndola o Barquilla, contiene los componentes más importantes de la turbina eólica. El personal de servicio puede entrar en la góndola por la torre de la turbina. A la izquierda de la góndola, se tiene el rotor de la turbina (Las palas y el cubo).

- A. **Palas del rotor:** Capturan el viento y transfieren su poder al cubo del rotor. Con el pasar de los años éstas han sido mejoradas, en cuanto a los materiales utilizados para su fabricación, así como el diseño de las mismas, ya que la tendencia actual es la de crear palas con perfiles alabeados para reducir la resistencia aerodinámica.
- B. **Buje:** Está adjunto al eje de baja velocidad de la turbina eólica.
- C. **Eje de baja velocidad:** Conecta el cubo del rotor a la caja de engranes. Como se entiende este eje gira relativamente despacio (20-30 rpm). El eje contiene tubos para el sistema hidráulico permitiendo operar a los frenos aerodinámicos.
- D. **Caja multiplicadora:** Tiene el eje de baja velocidad a la izquierda. Este sistema de transmisión permite que el eje de salida, el eje de alta velocidad, gire aproximadamente 80 veces más rápido que el eje de baja velocidad.
- E. **Eje de alta velocidad:** Gira aproximadamente con 2000 rpm, dependiendo de la turbina, y provee de energía mecánica al generador eléctrico. Está provisto con un freno a disco de emergencia. El freno mecánico se usa en caso de fallo del freno aerodinámico, o cuando la turbina se encuentra en reparación o mantenimiento.
- F. **Generador eléctrico:** Es normalmente un generador llamado de instalación o asíncrono. La potencia de estos, puede variar desde los KW hasta los MW.

- G. **Controlador electrónico:** Es un sistema que continuamente supervisa las condiciones de la turbina, controla el mecanismo de orientación. En caso de fallo (recalentamiento de la caja de engranes o el generador), detiene la turbina y envía una señal al operador de la turbina.
- H. **Grupo hidráulico:** Se usa para re-calibrar los frenos aerodinámicos de la turbina.
- I. **Unidad de enfriamiento:** Contiene un ventilador eléctrico que refresca al generador. Además, consta de una unidad de aceite refrigerante usada para la protección del generador y la caja de engranes. Algunas turbinas utilizan también agua como refrigerante.
- J. **Torre:** Da soporte a la góndola y el rotor. Generalmente, es una ventaja tener una torre alta, debido a que la velocidad de una corriente de viento, aumenta conforme esta se aleja de la superficie. Las torres pueden ser tubulares o reticuladas. Las tubulares son más seguras para el personal de mantenimiento, ya que este puede ascender mediante la escalera interior. La ventaja de las reticuladas es que son más baratas.
- K. **Mecanismo de orientación:** Usa motores eléctricos que giran la góndola para ubicarla en contra del viento. Este mecanismo es operado por el controlador electrónico que detecta la dirección del viento con ayuda de una veleta.
- L. **Anemómetro y veleta:** Se usan para medir la velocidad y dirección del viento. Las señales del anemómetro son usadas por el controlador electrónico para dar arranque a la turbina eólica cuando la velocidad del viento alcanza aproximadamente unos 5 m/s. El sistema detendrá la turbina si la velocidad del viento excede los 25 m/s, para proteger los componentes de la turbina. Las señales de la veleta son usadas por el controlador electrónico para ubicar la turbina contra el viento, a través del mecanismo de orientación.

#### **d.2.2.1. Transformación de energía. Rendimiento**

Fernández [3], nos dice que la transformación de energía que se produce en un aerogenerador lleva asociada, inevitablemente, unas pérdidas de potencia en los diferentes componentes del sistema.

La potencia del viento que incide sobre un rotor cuya área barrida es  $A$  ( $m^2$ ), es proporcional a la densidad,  $\rho$  ( $Kg/m^3$ ) y al cubo de la velocidad del viento,  $v$  ( $m/s$ ).

$$P_W = \frac{1}{2}(\rho)(A)(v^3) \quad (1)$$

El límite de Betz, establece que cualquier sistema de aprovechamiento del recurso eólico puede transformar como máximo un 59.3% de la potencia indicada en la ecuación (1). El factor que relaciona la potencia mecánica desarrollada por la turbina en el eje de baja velocidad,  $P_{m,b}$  y la potencia  $P_W$ , que se denomina coeficiente de potencia mecánico,  $C_{P,m}$ . Este coeficiente de potencia se puede interpretar como el rendimiento que presenta el rotor eólico y depende fundamentalmente de la velocidad del viento, de la velocidad de giro de la turbina y del ángulo de calado de las palas. De forma más concisa, esta dependencia se puede sintetizar en dos parámetros adimensionales: el ángulo de paso de la pala,  $\beta$ , y el coeficiente de velocidad específica,  $\lambda$ , que es la relación entre la velocidad lineal en la punta de la pala y la velocidad del viento incidente. Es decir, El coeficiente  $C_{P,m}$  está en función de los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$ .

$$P_{m,b} = P_W[C_{P,m}(\lambda, \beta)] \quad (2)$$

Esta potencia mecánica,  $P_{m,b}$  se transmite al eje de alta velocidad a través del tren de potencia, entregando al eje del generador eléctrico una potencia  $P_{m,a}$ . las pérdidas de potencia que se producen en el sistema mecánico se pueden dividir en dos partes: (1) rozamiento existente en los cojinetes y los cierres de contacto del eje,  $\eta_{m1}$ , y (2) rendimiento de la caja multiplicadora,  $\eta_{m2}$ . El producto de estos dos rendimientos se considera el rendimiento mecánico,  $\eta_m = \eta_{m1} (\eta_{m2})$ . Ambos términos del rendimiento mecánico dependen de la velocidad de giro y de la potencia transmitida. La potencia mecánica  $P_{m,a}$  se puede expresar entonces como:

$$P_{m,a} = P_{m,b}(\eta_m) = P_W[C_{P,m}(\lambda, \beta)](\eta_m) \quad (3)$$

Por último, el generador eléctrico, los convertidores electrónicos (en caso de que existan), los cables de salida del generador y el transformador de conexión a red convierten la potencia mecánica disponible en el eje del generador,  $P_{m,a}$  en potencia eléctrica  $P_e$ . En todos

estos componentes se producen pérdidas de energía que se han de contabilizar a la hora de definir el rendimiento eléctrico del sistema,  $\eta_e$ . Las pérdidas que se producen en el generador eléctrico y en el transformador de conexión a red se clasifican como pérdidas fijas o variables. Las pérdidas fijas o pérdidas en el hierro se producen debido a que el material magnético está sometido a un flujo variable con el tiempo. Estas pérdidas dependen del módulo y frecuencia de la tensión aplicada. Las pérdidas variables o pérdidas en el cobre se deben al calentamiento producido por el paso de corriente eléctrica con los conductores. Las pérdidas en los convertidores electrónicos se clasifican en pérdidas por conducción y pérdidas por conmutación. Las primeras se producen cuando los semiconductores del convertidor electrónico están conduciendo, dependen de la caída de tensión en conducción y de la intensidad que circula por ellos. Las pérdidas por conmutación se deben a que es necesario aplicar en cada conmutación del semiconductor una energía para producir el cambio de estado.

Así, la potencia eléctrica final se puede expresar como:

$$P_e = P_{m,a}(\eta_e) = P_W[C_{P,m}(\lambda, \beta)](\eta_m)(\eta_e) \quad (4)$$

No es práctica habitual entre los fabricantes de aerogeneradores, incluir en el rendimiento eléctrico las pérdidas debidas al transformador de conexión. Si se consideran en algún estudio, se ha de especificar claramente que el rendimiento eléctrico incluye estas pérdidas.

El producto del coeficiente de potencia mecánico por el rendimiento mecánico y eléctrico se denomina coeficiente de potencia eléctrico  $C_{P,e}$ .

$$C_{P,e} = [C_{P,m}(\lambda, \beta)](\eta_m)(\eta_e) \quad (5)$$

Existen otras pérdidas que no se consideran habitualmente y que corresponden a los servicios auxiliares del aerogenerador. Estos sistemas son los encargados de aportar energía a: los motores del sistema de orientación de la góndola, grupo hidráulico, alumbrado interior de góndola y torre, alimentación de instrumentos de medida y control, etc.

En la Figura 13., se representa el coeficiente de potencia mecánico  $C_{P,m}(v)$ , y el coeficiente de potencia eléctrico  $C_{P,e}(v)$ , de un aerogenerador en función de la velocidad del viento. A partir de este último coeficiente se puede calcular la curva de potencia del aerogenerador para una densidad determinada como:

$$P_e(v) = \frac{1}{2}(\rho)(A)(v^3)[C_{P,e}(v)] \quad (6)$$

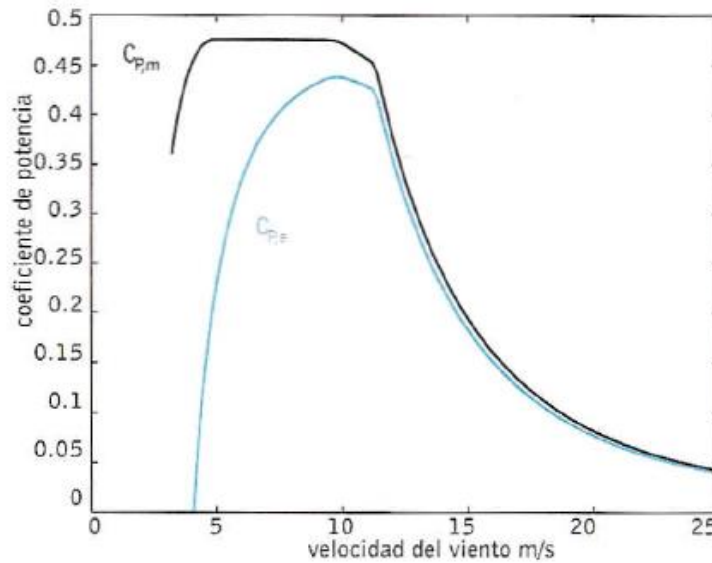


Figura 13. Coeficiente de potencia mecánico y eléctrico.  
Fuente: Arias Vega, 2006

Las pérdidas de potencia que se producen en un aerogenerador vienen provocadas no sólo por el rendimiento de los componentes, sino también por efectos como la sombra de torre, que puede suponer un 2% o 3% de pérdidas de potencia en aerogeneradores orientadas a sotavento. La desorientación de la góndola frente a la dirección del viento da lugar a pérdidas de potencia de un 1% o 2%, incluso en los sistemas de orientación más rápidos. Otro efecto que produce pérdidas de potencia es el deterioro de la superficie de las palas durante el periodo de operación de la turbina.

La evaluación de las pérdidas tiene importancia fundamentalmente cuando el aerogenerador funciona a carga parcial, esto es, cuando la potencia producida por el aerogenerador es inferior a la potencia eléctrica asignada. En estas condiciones, el sistema de control del

aerogenerador hará funcionar al sistema en unas condiciones tales que el rendimiento global de la instalación sea el mejor posible. Cuando la velocidad del viento supera la velocidad nominal, el aerogenerador trabaja en condiciones de plena carga, limitando potencia y velocidad de giro. Las pérdidas mecánicas y eléctricas permanecen constantes y el coeficiente de potencia mecánico se reduce para mantener la potencia eléctrica dentro de los límites permitidos.

En la Figura 14., se representa el rendimiento mecánico y eléctrico, así como, el flujo de potencia a plena carga en un aerogenerador de 1MW. Los rendimientos de los diferentes componentes son estimados, pero puede considerarse que el orden de magnitud se ajusta fielmente a los valores encontrados en la literatura especializada.

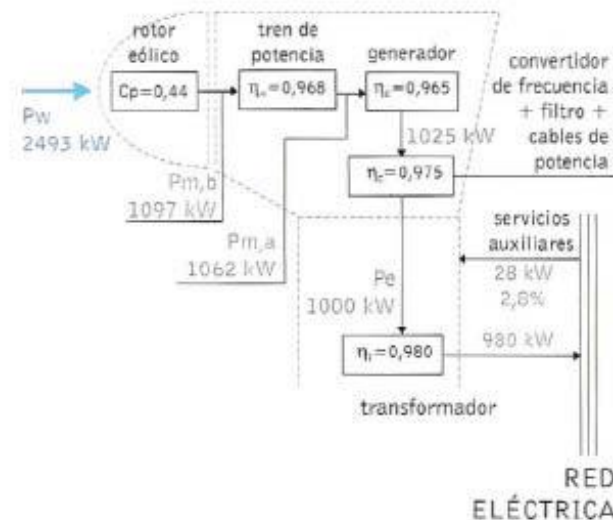


Figura 14. Rendimiento y flujo de potencia a plena carga de un aerogenerador de 1MW. (Los rendimientos incluidos son estimados)  
Fuente: Arias Vega, 2006

### d.2.3. Rotor eólico

Se entiende por rotor eólico el conjunto de componentes del aerogenerador que giran fuera de la góndola. Estos componentes son las palas, el buje y el mecanismo de cambio de paso de la pala. Desde un punto de vista de diseño y fabricación, cada uno de estos componentes se puede considerar como elementos independientes. Sin embargo, cuando se estudia su funcionamiento, es muy adecuado incluirlos, como partes del rotor eólico bien como componentes del tren de potencia. Las palas, claramente pertenecen al rotor eólico, sin

embargo, en cuanto al buje y al mecanismo de cambio de paso esta pertenencia no es tan clara.

El tipo de rotor eólico más adecuado en turbinas eólicas diseñadas para producir energía eléctrica es el rotor tipo hélice. Esta denominación se basa en que el principio de funcionamiento aerodinámico y estructural de las hélices estudiadas en la tecnología aeronáutica se puede aplicar a los rotores eólicos de los aerogeneradores de eje horizontal, aunque con algunas restricciones.

En la Figura 15., se representa la configuración de los rotores eólicos para dos turbinas de eje horizontal una de ellas orientada a barlovento y otra a sotavento. Las turbinas eólicas orientadas a sotavento presentan un ángulo de conicidad, que es el ángulo que forma el eje longitudinal de la pala con respecto al plano normal del eje de giro del rotor. Esta disposición de la pala hace que las fuerzas centrífugas originadas en la pala contrarresten los esfuerzos aerodinámicos de empuje.

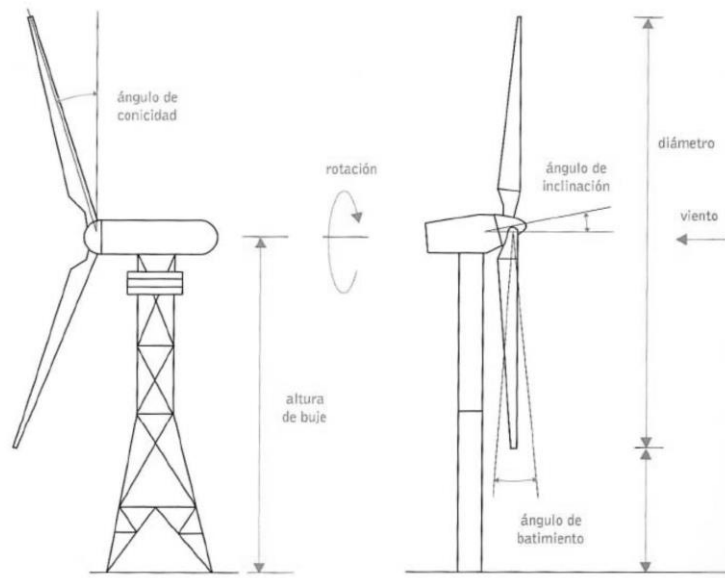


Figura 15. Configuración general de turbinas de eje horizontal.

Izquierda: Disposición sotavento.

Derecha: Disposición barlovento.

Fuente: Arias Vega, 2006

Otro de los parámetros importantes relacionados con el rotor eólico es la distancia libre entre la punta de la pala y la torre (clearance, en terminología inglesa). Esta distancia depende, del ángulo de conicidad, de la deformación elástica de la pala cuando está cargada

y del ángulo de inclinación del eje de rotación. Este ángulo de inclinación aumenta la distancia libre entre la pala y la torre, pero debe ser necesariamente pequeño, ya que reduce el área barrida por el rotor (proyección sobre un plano vertical de la superficie generada por las palas en su movimiento de giro) e introduce una componente vertical de par que tiende a girar la góndola. Sin embargo, sí se considera este ángulo en los diseños, ya que se han registrado accidentes en los que una pala ha chocado con la torre. Este tipo de fenómenos se produce normalmente en zonas de terreno complejo donde es probable que aparezcan perfiles inversos de la velocidad del viento que aumentan las cargas aerodinámicas y por lo tanto la deformación elástica justo en el momento que la pala pasa cerca de la torre.

Otro de los componentes del rotor es el buje, que es el elemento de unión de las palas con el sistema de rotación. Los bujes se pueden clasificar en dos tipos: bujes rígidos y bujes basculantes.

#### - **Buje rígido**

En este tipo de sistemas la pala se atornilla al buje y éste se fija rígidamente al eje de giro. Las palas se comportan con respecto al sistema de giro como una viga en voladizo que transmite todas las cargas que recibe directamente al tren de potencia. Este tipo de bujes se emplea en máquinas de tres palas donde el rotor está dinámicamente más equilibrado.

#### - **Buje basculante**

Para reducir las cargas que se producen en los bujes rígidos una opción es utilizar bujes basculantes. Estos bujes están conectados al tren de potencia a través de un apoyo que les permite pivotar libremente. Esta pieza permite pequeños movimientos (ángulos menores a un  $\pm 10\%$ ) en dirección perpendicular al rotor con respecto al plano de rotación. La frecuencia de este movimiento es proporcional a la velocidad de giro del aerogenerador (un ciclo por revolución, 1P). Este tipo de bujes se emplea con frecuencia en rotores de dos palas, ya que el efecto pivote hace que se equilibren las cargas aerodinámicas en cada vuelta.



Los aerogeneradores de mediana y gran potencia ( $> 500 \text{ KW}$ ) utilizan mecanismos de cambio del ángulo de paso de pala para controlar el par de arranque y el par de frenado durante las paradas del aerogenerador. Este sistema también se utiliza para limitar potencia cuando la turbina funciona a plena carga.

El ángulo de paso de pala, se define como el ángulo que forma la línea de sustentación nula de un perfil de pala con respecto al plano de giro del rotor. Este perfil de la pala se define para un radio determinado, habitualmente  $r/R = 0.75$ . El mecanismo de paso de pala puede controlar el ángulo de toda la envergadura de la pala o sólo de parte de ella.

El mecanismo de cambio de paso se puede clasificar en función del tipo de actuadores, hidráulicos o eléctricos, que accionan el mecanismo. Así mismo, estos sistemas pueden ser individuales o colectivos, es decir el sistema de actuación que hace girar las palas se puede aplicar pala a pala o de forma conjunta. La desventaja que presentan los sistemas individuales es la redundancia que supone disponer de tres frenos aerodinámicos en caso de que se produzca una parada de emergencia.

Otro mecanismo de control aerodinámico que utilizan los sistemas que no incorporan sistemas con cambio de paso son los aerofrenos. Estos dispositivos se denominan también frenos aerodinámicos en la punta de la pala. Su principio de funcionamiento se basa en girar el ángulo de calado de la punta de la pala un valor cercano a  $90$  grados, esto hace que aumenten considerablemente las fuerzas de arrastre y se reduzcan las de sustentación, lo que da lugar a que aparezcan pares de frenado que tienden a reducir la velocidad de giro de la máquina. También se utilizan otros dispositivos basados en aumentar las fuerzas de arrastre para frenar el rotor eólico, como los spoilers o brakeflaps.

#### **d.2.3.1. Parámetros de diseño de rotores eólicos**

Bastianón [5] señala que el proceso de diseño de un rotor eólico consiste en definir la geometría más adecuada de las palas para conseguir que las actuaciones de la turbina sean las esperadas. Se entiende por actuación de la turbina la potencia que es capaz de desarrollar ante variaciones de la velocidad del viento, la velocidad de giro y el ángulo de paso de pala.

El criterio de optimizar las actuaciones de la turbina no se debe considerar como el único, ya que el diseño del rotor debe tener en cuenta que las palas sean de fácil fabricación y tengan una adecuada resistencia estructural.

Las actuaciones del rotor están ligadas fundamentalmente a la forma del coeficiente de potencia del rotor eólico. La dependencia de este coeficiente se puede expresar en función de parámetros adimensionales en los que intervienen la forma geométrica del rotor, la operación de la máquina y las características del viento.

Los parámetros relacionados con la geometría del rotor son:

- Diámetro del rotor,  $D$
- Número de palas,  $N$
- Tipo de perfil aerodinámico,  $(L/D)_{\text{máx}}$
- Forma en planta, cuerda del perfil,  $c$
- Espesor relativo,  $d/c$
- Ángulo de torsión,  $\theta_{\text{tor}}$

Las correspondientes a la operación de la máquina son:

- Velocidad de giro de la turbina,  $n$  (rpm)
- Ángulo de paso de la pala,  $\beta$

Y las características del viento:

- Densidad,  $\rho$
- Viscosidad,  $\mu$
- Velocidad del viento,  $v$

A partir de los parámetros anteriores se puede expresar el coeficiente de potencia del rotor eólico en función de los siguientes números adimensionales:

$$C_{P,m} = f\left(N, \frac{L}{D}, \frac{d}{c}, AF, \lambda, \beta, \theta, Re\right) \quad (7)$$

$L/D$  es el coeficiente entre la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre en el perfil.

$AF$  se define como el factor de actividad. Este factor indica la capacidad estructural de un rotor para generar energía; se define en la forma:

$$AF = \frac{10^5}{32} \int_{\text{Raíz}}^{\text{Punta}} \frac{l}{R} \left(\frac{r}{R}\right) d\left(\frac{r}{R}\right) \quad (8)$$

Siendo  $l$  la longitud de la cuerda media,  $R$  el radio de la pala y  $r$  la distancia al eje. Los valores admisibles del factor de actividad están comprendidos entre 15 y 60. Con valores por debajo de 15 el rotor carece de resistencia estructural. Así valores altos de  $AF$  corresponden a palas robustas y valores bajos de  $AF$  corresponden a palas finas.

$Re$  es el número de Reynolds que mide la relación entre las fuerzas convectivas y las fuerzas viscosas.

#### - **Influencia del número de palas**

En las aeroturbinas rápidas un aumento del número de las palas supone un incremento del coeficiente de potencia máximo como se muestra en la Figura 16. Esta dependencia no se puede extrapolar a los rotores multipala, ya que aunque disponen de un mayor número de palas el coeficiente de potencia máximo es inferior al de las aeroturbinas rápidas, Figura 10.

En la Figura 16., se observa como el coeficiente de potencia máximo se incrementa cuando aumenta el número de palas. El paso de 1 a 2 palas supone un incremento del 10% de 2 a 3 palas un (3-4)% y de 3 a 4 sólo un 1%. Esto explica la razón por la que no es rentable emplear aeroturbinas de 4 palas en vez de 3, ya que el aumento de energía que se obtiene al incrementar esta última pala no justifica su empleo.

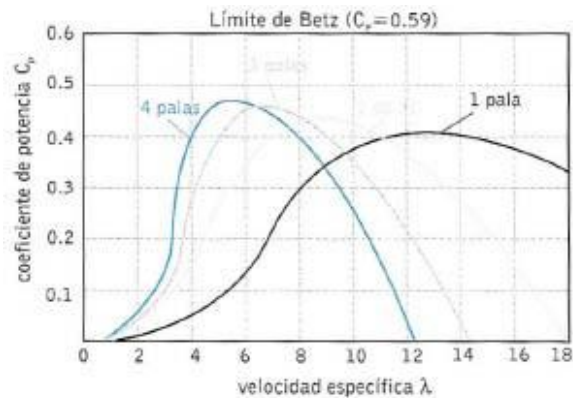


Figura 16. Influencia del número de palas sobre el coeficiente de potencia.  
Fuente: Arias Vega, 2006

### - Diseño óptimo de la pala. Factor de actividad

El coeficiente de potencia y por lo tanto la potencia mecánica desarrollada por una turbina depende en gran medida de la geometría de sus palas. Es posible obtener de forma matemática la geometría óptima de las palas empleando la teoría del elemento de pala (strip theory). Una buena aproximación a esta geometría debe ser uno de los objetivos del diseñador, sin embargo, la geometría final vendrá impuesta también por criterios estructurales y de fabricación.

La forma en planta de la pala se determina cualitativamente mediante el factor de actividad. En la Figura 17., se presentan los factores de actividad para diseños óptimos de rotores tripala. Factores de actividad elevados implican velocidades específicas de diseño,  $\lambda$ , reducidas. Esto hace que el factor de actividad deba reducirse cuando la velocidad de giro aumenta. En el diseño óptimo, velocidades específicas de diseño crecientes implican menor torsión de las palas.

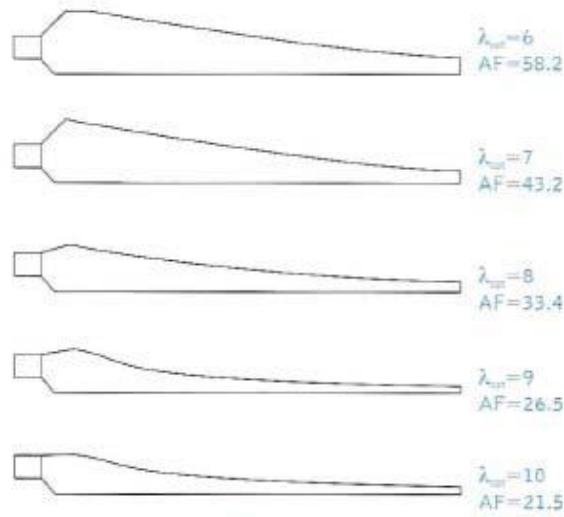


Figura 17. Factor de actividad en un diseño óptimo en función de la velocidad específica de diseño.  
Fuente: Arias Vega, 2006

Si se sustituye la geometría óptima de las palas por otras configuraciones más fáciles de construcción como son: la regular o la semi-trapezoidal, se observa que al menos en esta última configuración, el coeficiente de potencia no se diferencia mucho de la geometría óptima. En el caso de la configuración rectangular el coeficiente de potencia máximo se reduce considerablemente y se produce un deslizamiento en el parámetro  $\lambda$  de diseño (Figura 18.).

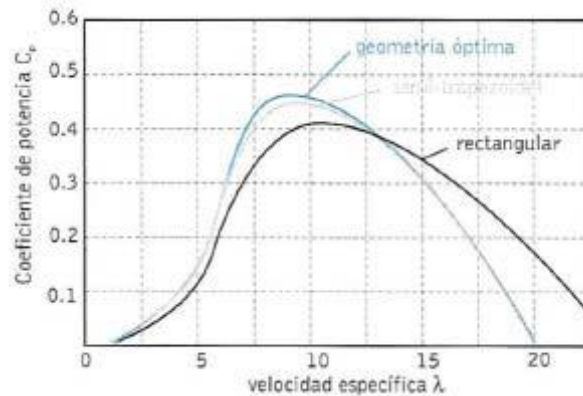


Figura 18. Influencia de la geometría de las palas en el coeficiente de potencia.  
Fuente: Arias Vega, 2006

- **Valores de cuerda**

**Coefficiente de Solidez  $\Omega$ :**

Para determinar la solidez, se debe tomar en cuenta un factor correspondiente a la Relación de velocidad específica o periférica (TSR), el cual se toma de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1. Velocidad específica o periférica para máquinas de viento de eje horizontal.  
Fuente: Fernández Pedro, 2001

<i>Tipo de máquina</i>	<i>TSR de diseño</i>	<i>Tipo de pala</i>	$C_y/C_x$
<i>Bombeo de agua</i>	1	<i>Placa plana</i>	10
	1	<i>Placa curvada</i>	20-40
	1	<i>Ala de tela</i>	10-25
<i>Generadores eólicos pequeños</i>	3-4	<i>Perfil simple</i>	10-50
	4-6	<i>Perfil alabeado</i>	20-100
	3-5	<i>Ala de tela</i>	20-30
<i>Generadores eólicos grandes</i>	5-15	<i>Perfil alabeado</i>	20-100

La solidez de la hélice  $\Omega$  es la relación entre la superficie  $A_p$  ocupada por las palas y la superficie frontal barrida por la hélice  $A$ . Para determinar este coeficiente se puede recurrir a la siguiente figura ( $\Omega$  se encuentra expresado en %, así 20%=0.2):

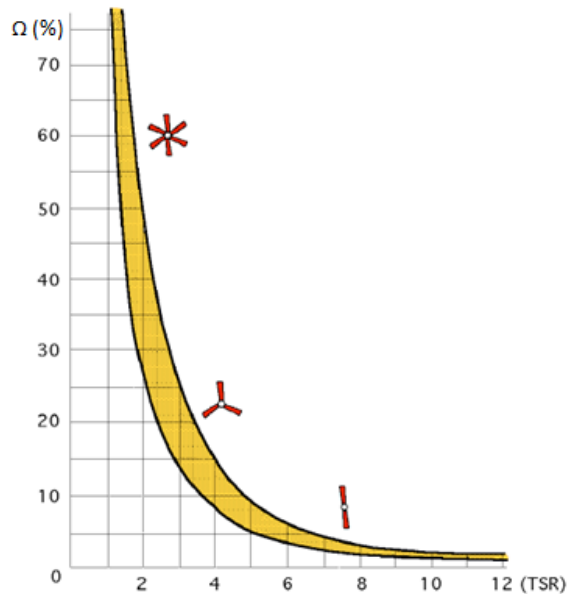


Figura 19. Relación entre el coeficiente de solidez y el TSR  
Fuente: Fernández Pedro, 2001

Con el coeficiente de solidez, se calcula la longitud de cuerda media de acuerdo a la relación:

$$\Omega = \frac{\bar{c}N}{\pi r} \quad (9)$$

$r$ =Radio de la pala.

$N$ = Número de palas.

$\bar{c}$ = Cuerda media

Con el valor de cuerda media se puede calcular el valor de cuerda de punta de pala  $c_{pp}$  y el de cuerda raíz  $c_{raíz}$ . Esto se calcula utilizando una variación lineal mediante:

$$c_{pp} = \bar{c} - 0.025l \quad (10)$$

$$c_{raíz} = \bar{c} + 0.025l \quad (11)$$

Donde  $l$  es la longitud útil de la pala

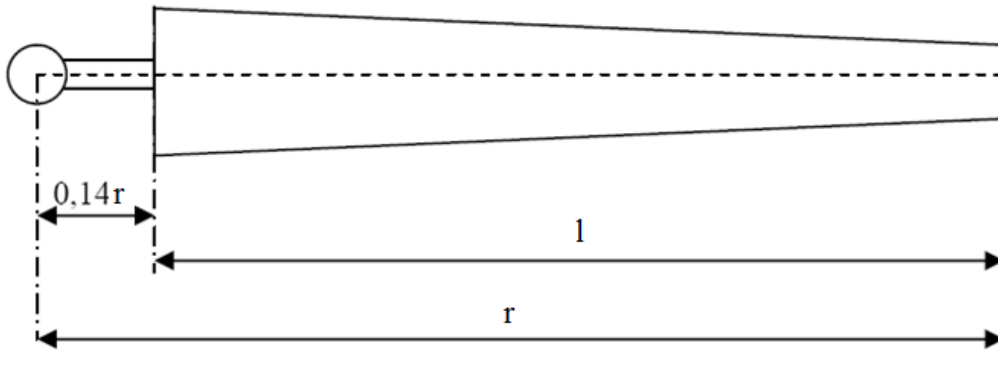


Figura 20. Longitud útil de la pala.  
Fuente: Fernández Pedro, 2001

### - Distribución de torsión

La velocidad efectiva que incide en cada perfil aerodinámico aumenta desde la raíz a la punta de la pala. Para mantener constante el ángulo de ataque, y por tanto las fuerzas aerodinámicas generadas en cada perfil, el ángulo de calado se debe reducir en los perfiles cercanos a la punta. Esto hace que se diseñen las palas con una determinada ley de torsión con ángulos de calado mayores en la raíz que en la punta, donde la cuerda del perfil es prácticamente paralela al plano de giro del rotor.

La ley de torsión que da lugar a un diseño óptimo es de difícil ejecución durante el proceso de fabricación de las palas, por lo que habitualmente se construyen utilizando una geometría más sencilla. En el diseño final se procura que los ángulos de torsión óptimos correspondan a la zona de la punta de la pala, siguiendo una variación lineal hasta la raíz. Este criterio se aplica ya que la zona de la punta es la parte aerodinámicamente más activa de la pala. En estas condiciones, el coeficiente de potencia máximo puede ser un 2% inferior al que se obtendría con un diseño óptimo.

Las desviaciones del ángulo de torsión en la punta de la pala producen una reducción muy importante del coeficiente de potencia máxima (Figura 21.).

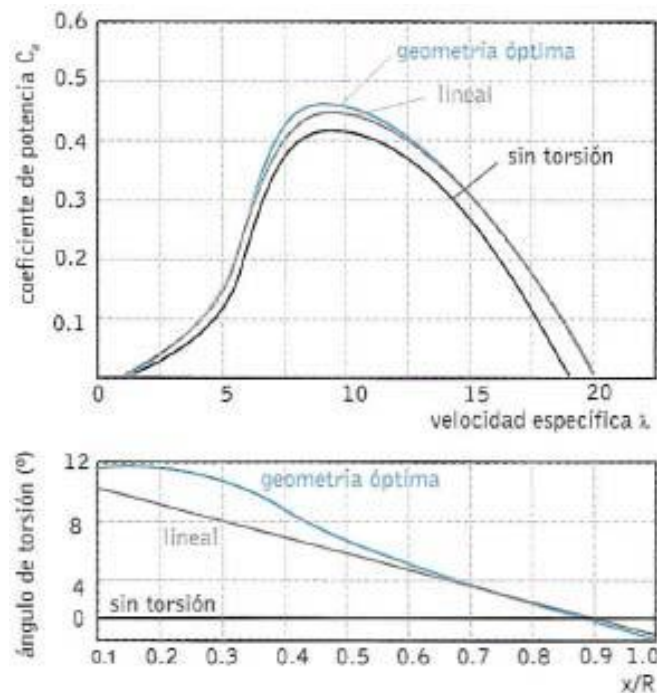


Figura 21. Influencia de la ley de torsión de las palas en el coeficiente de potencia.  
Fuente: Arias Vega, 2006

### - Tipo de perfil aerodinámico

El tipo de perfil aerodinámico es uno de los parámetros de diseño más determinantes en el funcionamiento de turbinas eólicas rápidas. La influencia del perfil sobre el coeficiente de potencia del aerogenerador, viene determinada por el denominado rendimiento aerodinámico  $L/D$ , se reduce drásticamente y de igual forma el coeficiente de potencia.



Para las aeroturbinas lentas el factor de diseño dominantes es el número de palas frente al rendimiento aerodinámico, que no juega un papel decisivo. Por el contrario, para las aeroturbinas rápidas el rendimiento aerodinámico es un parámetro clave en el diseño del rotor(Figura 22.).

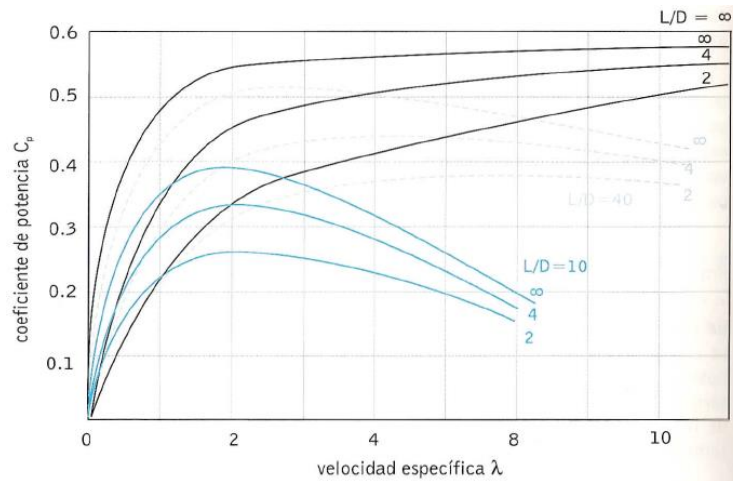


Figura 22. Influencia del rendimiento aerodinámico en el coeficiente de potencia.  
Fuente: Arias Vega, 2006

Los perfiles utilizados tradicionalmente en rotores de aeroturbinas son los mismos que se utilizan de forma generalizada en la industria aeronáutica, sin embargo en los últimos años se han realizado diseños específicos, para aeroturbinas.

En la Figura 23., se muestra una forma típica de perfil aerodinámico y se indican las magnitudes que definen su geometría.

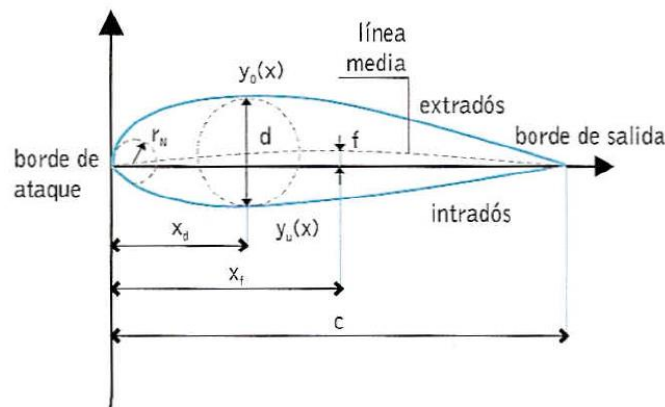


Figura 23. Parámetros geométricos de un perfil NACA.  
Fuente: Arias Vega, 2006

- Cuerda,  $c$  (m): Línea que une los puntos extremos del perfil.

- Espesor relativo ( $d/c$ ): Medida en tanto por ciento del espesor máximo perpendicular a la línea media del perfil respecto a la cuerda.
- Posición del máximo espesor  $x_d$ .
- Línea media: Define la curvatura del perfil.
- Máxima curvatura ( $f/c$ ): Medida en tanto por ciento de la máxima curvatura del perfil, flecha máxima  $f$ , respecto de la cuerda.
- Posición de la máxima curvatura,  $x_f$ .
- Radio de la nariz,  $r_N$ .
- Borde de ataque: Zona anterior del perfil.
- Borde de salida: Zona posterior del perfil.
- Intradós: Cara de presión.
- Extradós: Cara de succión.
- Coordenadas  $y_0(x)$  e  $y_u(x)$ , indican las coordenadas del extradós y del intradós respectivamente.

Algunas de estas especificaciones se indican de forma indexada en la nomenclatura de los perfiles NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). La nomenclatura de los perfiles NACA se realiza mediante series de varios dígitos (4 dígitos, 5 dígitos, series 1, series 6, series 7, series 8).

#### **NACA 4 dígitos**

El primer dígito (**m**) expresa la curvatura máxima en porcentaje de la cuerda. La curvatura máxima es la distancia máxima medida entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda.

El segundo dígito (**p**) indica la posición en la que ocurre la curvatura máxima expresada en porcentaje del valor de la cuerda. Esta posición es medida desde el borde de ataque. Este valor de **p** está expresado en décimas, así que para obtener el porcentaje real se multiplica el segundo dígito por 10.

Los dos últimos dígitos (**t**) expresan el máximo espesor, que es la distancia máxima medida entre el extradós e intradós, expresada en porcentaje de la cuerda

Aquellos perfiles NACA de 4 dígitos, cuyas 2 primeras cifras son 00, son simétricos respecto a la cuerda.

Los perfiles NACA y su nomenclatura han sufrido una gran cantidad de cambios, y ahora los nuevos perfiles se indican con más de 5 dígitos. Aparte de los perfiles NACA, existen otro tipo de perfiles normalizados como los americanos de la serie SERI o LS, diseñados específicamente para aeroturbinas, o los del instituto Aeronáutico de Suecia (FFA).

Los perfiles convencionales utilizados en generación eólica son los de la serie NACA 230XX y NACA 44XX, que tienen valores de rendimiento aerodinámico, L/D entre 100 y 120, con coeficientes de sustentación de operación de 1.0 a 1.1., este tipo de perfiles tiene la propiedad de presentar un reducido valor del coeficiente de arrastre para un amplio margen de ángulos de ataque. No obstante, son bastante sensibles a la rugosidad superficial provocada por la adhesión del polvo, insectos, etc. El problema de la rugosidad superficial de las palas es particularmente importante en rotores diseñados para controlar su potencia por pérdida aerodinámica. Cuando la rugosidad aumenta las actuaciones del perfil se reducen rápidamente en la zona de máxima sustentación y el desprendimiento del flujo se produce para ángulos de ataque reducidos, lo que provoca que el fenómeno de la pérdida aerodinámica aparezca a velocidades del viento reducidas.

Con los valores de m, p y t de la serie de 4 dígitos se puede determinar las coordenadas (x, y) del perfil alar utilizando las ecuaciones mostradas a continuación:

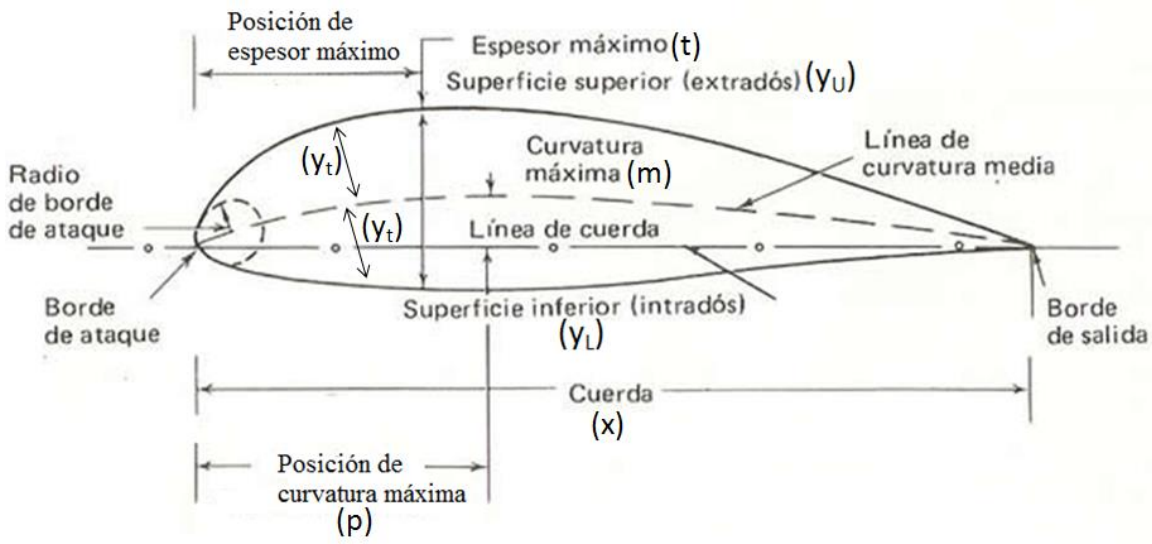


Figura 24. Construcción geométrica de un perfil NACA.

1. Se eligen valores de  $x$  desde 0 hasta la cuerda máxima  $c$ .
2. Calcular las coordenadas de la línea de curvatura media introduciendo los valores de  $m$  y  $p$  dentro de las siguientes ecuaciones:

$$y_c = \frac{mx}{p^2} (2p - \frac{x}{c}); \text{ Desde } x=0 \text{ hasta } x=p \quad (12)$$

$$y_c = \frac{m(c-x)}{(1-p)^2} (1 + \frac{x}{c} - 2p); \text{ Desde } x=p \text{ hasta } x=c \quad (13)$$

3. Calcular la distribución de espesores por encima y por debajo de la línea media introduciendo el valor de  $t$  dentro de la siguiente ecuación.

$$y_t = \frac{t}{0.2} c [0.2969 \sqrt{x/c} - 0.1260(x/c) - 0.3516(x/c)^2 + 0.28430.3516(x/c)^3 - 0.10150.3516(x/c)^4] \quad (14)$$

4. Determinar el ángulo que forman las tangentes a la línea de curvatura media con la línea de cuerda para cada punto. Para ello derivamos las ecuaciones de la curvatura media con respecto de  $x$ :

$$\theta = \arctan\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \quad (15)$$

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{2m}{p^2} \left(p - \frac{x}{c}\right); \text{ Desde } x=0 \text{ hasta } x=p \quad (16)$$

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{2m}{(1-p)^2} \left(p - \frac{x}{c}\right); \text{ Desde } x=p \text{ hasta } x=c \quad (17)$$

5. Determinar las coordenadas finales de la superficie superior ( $y_U$ ) y de la superficie inferior ( $y_L$ ) usando las siguientes relaciones:

$$x_U = x - y_t \sin\theta \quad (18)$$

$$y_U = y_c + y_t \cos\theta \quad (19)$$

$$x_L = x + y_t \sin\theta \quad (20)$$

$$(y_L = y_c - y_t \cos\theta) \quad (21)$$

### d.2.3.2 Tecnología de palas

#### - Geometría

El comportamiento aerodinámico de los rotores de aeroturbinas depende en gran medida de la geometría de la pala, que se define indicando la distribución de cuerdas, ángulos de torsión, espesores relativos y tipos de perfil a lo largo de su radio. Además, por la geometría de perfiles adoptada, definiremos también una distribución de grosores de material. Partiendo de esta información se definen algunos parámetros que caracterizan de forma sencilla la forma geométrica de las palas. Estos parámetros son:

- Solidez: Es la relación, expresada en %, entre la superficie en planta de las palas con respecto al área barrida por el rotor al que pertenece.
- Relación de aspecto: Cociente entre el radio de la pala al cuadrado y la superficie en planta de la pala.
- Relación de cuerdas: Cociente entre la cuerda en la punta y la cuerda en la raíz.
- Espesor relativo: Cociente entre el espesor del perfil respecto a la cuerda. Este parámetro se suele indicar para un radio determinado (por ejemplo  $r/R=0.7$ )

Para tener un orden de magnitud, en la siguiente tabla se presentan los valores de los parámetros anteriores para cuatro palas comerciales de diferente radio.

Tabla 2. Características geométricas de palas.

Fabricante	Aerpac APX29	LM-19	LM-26	LM-29
Radio (m)	14.5	19	26	29
$\lambda$ -diseño ( $C_{p,max}$ )	6-7	6-7	7	7.1
Solidez	4.1%	5.0%	5.7%	5.0%
Relación-aspecto	23	19	17	18
Espesor relativo ( $r/R=0.7$ )	20%	20%	18%	18%
Relación cuerdas	0.39	0.21	0.40	0.20
Perfil	NACA 63-6	LM-2 FFA-W3	NACA 63-4 FFA-W3	NACA 63-4

La relación de aspecto de las palas de turbinas eólicas suele ser bastante elevada (Tabla 2) con relación a los diseños de alas de avión. Este diseño de palas con relaciones de aspecto elevadas (palas muy esbeltas) da lugar a una distribución de espesores relativos que puede llegar incluso a no cumplir los requisitos estructurales. Los espesores relativos son más reducidos en la zona de la punta de la pala (12-15) % y se acercan más al diseño óptimo aerodinámico. Por el contrario, los espesores relativos aumentan en la zona cercana a la raíz. La prioridad de diseño en esta zona es aportar rigidez estructural a la pala, aunque la distribución de espesores no sea la más adecuada desde un punto de vista aerodinámico.

La distribución de cuerdas y del ángulo de torsión depende en gran medida de las preferencias que el diseñador establezca en las actuaciones de la aeroturbina. Así por ejemplo, palas con una relación de cuerdas mayor, esto es con longitudes de cuerda mayores en la punta, mejora el coeficiente de potencia a carga parcial y aumenta el par de

arranque. Sin embargo, este diseño penaliza el funcionamiento aerodinámico de la turbina a plena carga. Se han propuesto diseños con alerones en la punta para favorecer estos aspectos (Figura25.), sin embargo no han sido muy efectivos.

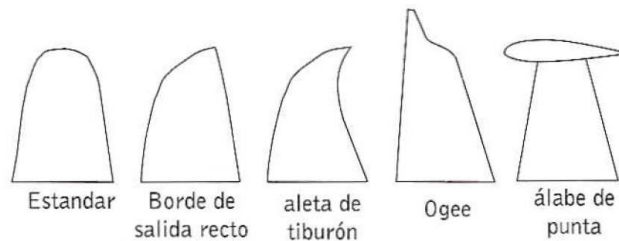


Figura 25. Forma geométrica de la punta de la pala.

La forma geométrica de la punta de la pala es otro aspecto que se debe considerar en el diseño aerodinámico ya que influye en la potencia generada de la turbina y en la emisión de ruido acústico. En la Figura 25., se muestran diferentes configuraciones de la punta de pala utilizadas en el diseño de rotores eólicos.

Los parámetros indicados anteriormente, se pueden considerar como una información resumida de la geometría de la pala. Sin embargo, las especificaciones técnicas de una pala deben incluir al menos: distribución de cuerdas, ángulo de torsión, tipo de perfil y espesor relativo a lo largo de toda la envergadura de la pala. En la Figura 26., se indican estos parámetros para una pala comercial.

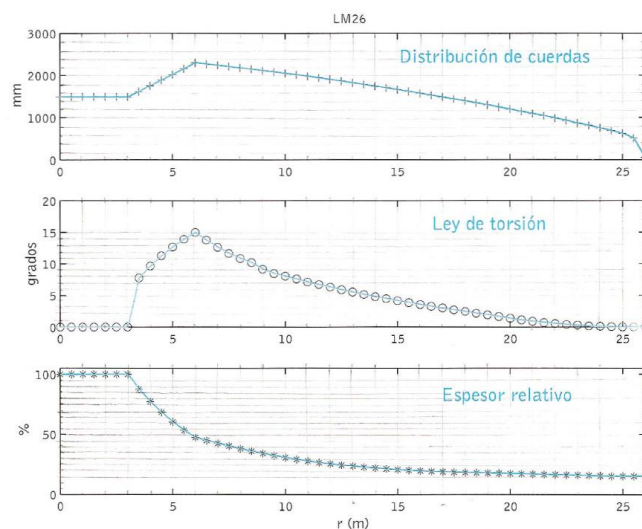


Figura 26. Distribución de cuerdas, torsión y espesor relativo de una pala comercial LM-26.  
Fuente: Arias Vega, 2006

## - **Materiales. Características estructurales**

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de palas es la elección de los materiales empleados en su fabricación. Una elección adecuada de estos materiales es vital ya que las propiedades estructurales (rigidez, resistencia a fatiga, peso, etc.) y en definitiva la vida útil de este componente de la turbina depende en gran medida de los materiales utilizados.

Históricamente los materiales empleados en el diseño de palas de aeroturbinas han sido la madera, el acero, el aluminio y más recientemente los materiales compuestos.

Los primeros diseños de pala se realizaron con madera. Este material tiene como ventajas su baja densidad, facilidad de mecanizado, buen comportamiento a fatiga y desde luego bajo coste. Sin embargo, sus propiedades mecánicas han sido superadas por otro tipo de materiales, además la propia naturaleza de la madera hace presente irregularidades en su constitución que puede provocar fisuras y por tanto una reducción de sus propiedades mecánicas. Otra desventaja del empleo de la madera es su capacidad de absorción de agua, que reduce igualmente su comportamiento estructural. Durante los años 80 el programa americano de tecnología de palas utilizó este material en sus diseños, de hecho un prototipo americano de la época, MOD-0, utilizaba palas de madera. El empleo actual de la madera como único material de las palas está en desuso, o se emplea para la construcción de palas de pequeño tamaño (hasta 10m). Hoy en día se utiliza la madera junto con la resina epoxy en la construcción de materiales compuestos.

El acero se utilizó durante los primeros años de la década de los 80 como material de palas en grandes máquinas, en concreto en los aerogeneradores Growian, MOD-2, WTS-75 y MOD-5B empleaban palas de acero. Las propiedades mecánicas de este material en cuanto a resistencia y tenacidad hicieron de este material una opción muy válida para la fabricación de palas, sin embargo su elevada densidad provoca un aumento considerable de cargas inerciales y gravitatorias sobre la turbina. Otra desventaja del acero es su facilidad para la corrosión, sin embargo este problema se soluciona con un adecuado tratamiento superficial.



El aluminio posee, al contrario que el acero, una baja densidad y un buen comportamiento frente a la corrosión, sin embargo presenta una resistencia a fatiga relativamente baja. Una aplicación tradicional de palas de aluminio ha sido en máquinas de eje vertical tipo Darrieus.

El diseño actual de las palas requiere una geometría específica y un tanto complicada de las mismas para optimizar su rendimiento aerodinámico. Por otra parte las palas deben presentar un peso reducido y tener un comportamiento mecánico adecuado durante su periodo de funcionamiento. Los materiales que cumplen todos estos requisitos son los denominados materiales compuestos.

El material compuesto más utilizado en la actualidad es la fibra de vidrio con resina de poliéster (GRP, glass reinforced plastic). Este tipo de material se empleó previamente con éxito en la industria naval y presenta como ventajas fundamentales su versatilidad de fabricación y sus buenas propiedades estructurales y de resistencia a fatiga. Tienen también un bajo coeficiente de dilatación y una reducida conductividad eléctrica lo que hace que estos materiales sean especialmente interesantes para la protección del sistema frente al rayo. Además los materiales compuestos son transparentes frente a las ondas electromagnéticas.

Otros materiales compuestos aún más recientes son los basados en fibra de carbono, (CFRP, carbón fiber reinforced plastic). Este tipo de material, que se usa en la industria aeronáutica, se considera actualmente muy caro para aplicaciones eólicas.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas de diferentes materiales utilizados en la fabricación de palas. Los parámetros que se presentan son:

- Densidad  $\rho$  ( $\text{g/cm}^3$ )
- Límite elástico del material  $\sigma_u$  ( $\text{N/mm}^2$ )
- Módulo de elasticidad  $E$  ( $\text{KN/mm}^2$ )
- Resistencia a la fatiga  $\pm \sigma_A [10^7]$  ( $\text{N/mm}^2$ )

Tabla 3. Características de los materiales empleados en la fabricación de palas de aerogeneradores.

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	E (kN/mm <sup>2</sup> )	$\pm\sigma_A[10^7]$ (N/mm <sup>2</sup> )
Acero	7.85	520	210	60
Aleación de acero	7.85	680	210	70
Madera	0.38	~ 65	~ 8	~ 20
Aluminio	2.7	480	70	40
F.V.(*) poliéster	1.8	~ 400	~ 15	---
F.V.(*) epoxy	1.7	~ 400	15	---
F.C.(*) epoxy	1.4	550	44	---
Madera - epoxy	0.58	~ 75	~ 11	~ 35

#### - Comparación de palas en el diseño de rotores eólicos

En el apartado anterior se presentaron los aspectos de diseño más relevantes de la tecnología de palas de aeroturbinas. Establecer qué diseño es el más adecuado requeriría cuantificar entre distintas tecnologías de palas el rendimiento aerodinámico, el peso, la resistencia a fatiga o el coste para las palas de la misma longitud. Además, estos elementos de comparación se modifican sensiblemente cuando las palas forman parte de turbinas de dos o tres palas. Por ejemplo, las palas que se montan en máquinas tripala presentan un diseño estructural más robusto que las montadas en máquinas bipala con bujes basculantes. No obstante, a pesar de la dificultad que entraña este tipo de comparaciones, un parámetro que objetivamente indica mejoras en el diseño y en el uso de nuevos materiales es el peso específico (peso de la pala por unidad de área barrida).

Es evidente que el peso total de la pala debe aumentar cuando lo hace el diámetro de la turbina, sin embargo este aumento también se presenta cuando se cuantifica de forma relativa, es decir el peso específico de las palas (kg/m<sup>2</sup>) aumenta también con el diámetro. Este hecho es debido a que mientras el peso de las palas y los momentos flectores sobre la raíz aumentan de forma aproximada siguiendo una ley cúbica con el diámetro, las cargas debidas al peso pueden crecer incluso con la potencia cuarta, en especial en grandes máquinas. Esto hace que, considerando rendimientos aerodinámicos similares, las palas

más ligeras que cumplen los requisitos estructurales de la turbina presenten ventajas evidentes en cuanto a transporte, montaje y reducción de cargas gravitatorias sobre elementos como el buje o la torre. Analizando los datos de diferentes fabricantes de aerogeneradores, se puede concluir que la variación del peso de las palas con respecto al diámetro sigue una ley tipo:

$$m_p = 0.10(D^{2.63}) \quad (22)$$

Donde la masa de la pala viene expresada en Kg y el diámetro de la turbina (D) en m.

La dependencia del peso con el diámetro de las palas tiene que ver en gran medida con los materiales utilizados en su construcción. Los diseños iniciales de palas de acero son los que presentan un mayor peso específico. Las palas fabricadas con material compuesto (fibra de vidrio con resina poliéster o resina epoxy, madera con resina epoxy y fibra de vidrio-carbono con resina epoxy) presentan pesos específicos más reducidos, en concreto las palas que utilizan fibra de carbono representan el estado del arte actual en el diseño de palas ligeras.

## **CAPÍTULO III**

### **d.3. AERODINÁMICA DE AEROTURBINAS**

En esta sección se trata de comprender el mecanismo básico de conversión de energía de las turbinas eólicas. Solo con ello es posible entender sus posibilidades, límites y características operativas, siendo relevante para el diseño de estrategias de control. El cálculo de las cargas y la resolución de los problemas dinámicos sólo es posible a través de un profundo conocimiento de los procesos aerodinámicos del rotor.

#### **d.3.1. Teoría de Cantidad de Movimiento y Límite de Betz**

Arias Vega [6], propone que las turbinas eólicas extraen potencia del viento detrayendo cantidad de movimiento de la corriente, pues no pueden variar su presión, que es la

atmosférica<sup>1</sup>. Resulta útil conocer cuál es el límite superior de energía extraíble. Para ello es necesario suponer una situación en la cual se realicen los procesos de una forma ideal. Consecuentemente es necesario eliminar todos aquellos efectos disipadores de la energía, debidos a la viscosidad del aire, que contribuyen a la ineficiencia.

1. En primer lugar se supone que el aire es un fluido ideal, sin viscosidad. Ésta hipótesis no está muy alejada de la realidad pues el movimiento alrededor de una turbina se realiza a elevados números de Reynolds (relación entre las fuerzas de inercia y viscosidad). Se asume pues, un número de Reynolds infinito, con lo que las degradaciones de energía por viscosidad serán inexistentes.
2. Para simplificar el estudio y evitar pérdidas, se supone que el viento incidente es unidimensional y de presión, densidad y velocidad uniforme. Además, se supone que la aeroturbina está lo suficientemente alejada de todo obstáculo para que su influencia sea despreciable. El suelo hace notar su presencia en el flujo de una aeroturbina, pero por ahora se desprecia.
3. Resulta adecuado también suponer que la corriente se realiza a números de Mach infinitamente pequeños ( $M=0$ ), es decir, que el aire tiene una velocidad del sonido infinitamente mayor que las velocidades involucradas y por lo tanto se comporta como un fluido incompresible. La corriente alrededor de una aeroturbina alcanza velocidades relativas al álabe que son máximas en su punta, la cual se puede mover unas 6 veces la velocidad del viento, por lo tanto, se puede superar los 100 m/s, no despreciable frente a los 340 m/s de la velocidad del sonido en la atmósfera, por lo que  $M= (100\text{m/s})/(340\text{m/s})$ . Afortunadamente los efectos disipadores debidos a la compresibilidad del flujo no empiezan a ser apreciables más que cuando el número de Mach incidente en la pala es muy próximo a la unidad.

---

<sup>1</sup>Se verá en lo que sigue que podrá variar la presión del flujo afectado por ellas y solamente de forma local. Sin embargo, lo suficientemente alejados de las aeroturbinas, la presión ha de ser la atmosférica.

4. Con el propósito de eliminar otras pérdidas se supone que el flujo es estacionario, es decir, invariable en el tiempo, luego todas las variables dependen exclusivamente del punto en el espacio, no del tiempo<sup>2</sup>.
5. Se verá más adelante que la forma que tiene una aeroturbina de extraer energía es haciendo que sobre las palas aparezca un par, que se transmite al eje. En consecuencia, por la necesaria conservación del momento de cantidad de movimiento, si con una corriente incidente puramente axial y uniforme se intercambia un par, es necesario que la corriente afectada adquiera por reacción un momento de cantidad de movimiento igual y contrario. En turbinas de eje horizontal esto significa que la corriente que ha atravesado la turbina tiene que tomar en su conjunto un movimiento de rotación alrededor del eje de la turbina tras atravesarla. La energía de esa rotación es una pérdida al suponer energía cinética que no se puede aprovechar. Normalmente se evita en las turbomáquinas que actúan dentro de un conducto, situando estatores tras los rotores para enderezar la corriente. Esto no resulta rentable ni conveniente en las aeroturbinas, por lo que este giro contribuye a disminuir la eficiencia. Sin embargo, dado que se está en una situación idealizada, se supone que se toma provisión para eliminar la rotación o bien no se tendrá en cuenta esta pérdida.

Dado que se trata de calcular el máximo de energía, ha de considerarse que cada punto de la corriente cede igual energía. Esto configura al rotor de la turbina como un disco, circunscrito a las puntas de las palas<sup>3</sup>, a través del cual el flujo pierde energía de forma uniforme en su superficie. De ahí que esta teoría se denomine también Teoría del disco poroso o del disco actuador. El flujo alrededor de este disco se ve afectado, desviándose, pero no existe mecanismo alguno en el flujo que permita extraer energía de él, con lo cual lo conserva alrededor de sus trayectorias.

---

<sup>2</sup>Como el número de palas es finito y éstas giran, el flujo es no estacionario. Sin embargo, es un hecho ampliamente reconocido y palpable, que el flujo antes de la aeroturbina y después de ella pierde información del paso de las palas muy rápidamente. Esto es, a distancia corriente arriba y corriente debajo de la aeroturbina del orden de su diámetro se nota un flujo estacionario.

<sup>3</sup>La teoría de turbomáquinas muestra que no es posible extraer energía del flujo que no atraviesa el disco descrito por el giro de las palas.

¿De qué manera puede perder energía el flujo justo al atravesar el disco? La conservación de la masa (o equivalentemente del volumen, al ser el flujo incompresible) aplicada a través del disco, nos dice que la velocidad axial justo antes del disco, debe de ser igual a la velocidad axial justo después de él, pero no es posible extraer energía efectuándose un salto en la velocidad axial. Tan solo es posible extraer energía permitiendo un salto en la presión.

Como consecuencia de todo lo dicho, el flujo queda caracterizado por ser estacionario, ideal e incompresible en todo el campo fluido, por lo que se puede aplicar la ecuación de Bernoulli a cada línea de corriente. Esta ecuación nos dice que la presión de remanso, denominada también de parada o presión total,  $p_t$  se conserva:

$$p_t = p + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (23)$$

Conservándose también la energía por unidad de masa,  $(p/\rho)$ ; luego, a través del disco no es aplicable la ecuación de Bernoulli, pues se realiza una extracción.  $p$  se denomina presión estática y  $\frac{1}{2}\rho v^2$  presión dinámica.

Antes de aplicar las ecuaciones de conservación al flujo, se establece un esquema fenomenológico del campo fluido, que posteriormente ha de resultar compatible con ellas. La Figura 27., representa el disco poroso o actuador visto de perfil y las líneas de corriente que encierran el tubo de corriente<sup>4</sup> que envuelve el fluido que pasa a través del disco. Desde el infinito aguas arriba, sección  $A_1$ , donde la velocidad es la del viento incidente  $v_1$ , uniforme, hasta llegar al infinito aguas abajo, sección  $A_2$  donde resulta una velocidad uniforme también  $v_2$ . En esta figura presentamos un disco frontal a la corriente, representativo de una turbina de eje horizontal de sección  $A=\pi D^2/4$ .

Por tratarse de un flujo subsónico, la perturbación generada en la turbina llega hasta el infinito en el campo fluido. Luego, la corriente incidente del viento nota la presencia del disco y dado que éste efectúa un freno a la corriente, tratará de rodearlo divergiendo las líneas de corriente y haciendo que el tubo de corriente que encierra el flujo que atraviesa el

---

<sup>4</sup>Se entiende por tubo de corriente a aquel encerrado por una superficie imaginaria en la cual la velocidad es tangente a ella, llamada superficie de corriente. Por lo tanto, el fluido no la atraviesa.

disco tenga una superficie creciente corriente abajo. Esto lo muestra la Figura 27., en el tramo  $A_1 \rightarrow A$ . esta divergencia sólo puede ser mantenida con gradientes de presión que curven las líneas de corriente hacia zonas de menor presión, luego necesariamente hay una presión distribuida uniformemente delante del disco,  $p^+$ , mayor que en la corriente libre,  $p_1$ . Por aplicación de la ecuación de Bernoulli, este aumento gradual de presión ha de traer consigo una disminución de velocidad, hasta llegar a la velocidad  $v$  en el plano del disco, menor que la incidente,  $v < v_1$ .

La extracción de energía del disco viene de una disminución de presión, luego en la cara trasera del disco tenemos una presión uniforme  $p^- < p^+$ . si esta presión resultara igual que  $p_1$ , la superficie de corriente divisoria aguas abajo del disco, sería recta y horizontal, pero ello no ocurre, como ya se verá, sino que la presión detrás del disco es menor que  $p_1$ . Al notar la superficie de corriente axilsimétrica divisoria este salto de presión se curva para que se restablezca la igualdad de presiones, lo cual sólo llega a completarse en el infinito aguas abajo,  $p_2 = p_1$ . Debido a ello, las líneas de corriente comienzan a converger a partir del disco, en el tramo  $A \rightarrow A_2$ , pero han de seguir aumentando el área del tubo de corriente para que baje la velocidad y correspondientemente suba la presión. La igualdad de presiones en el infinito corriente abajo no implica igualdad de velocidades, pues el fluido que atraviesa el disco ha perdido energía; tendrá necesariamente una velocidad menor  $v_2$ , creando una estela. En consecuencia se cumple que:

$$v_1 > v > v_2 \quad (24)$$

El tubo de corriente es una superficie a cuyos lados existe diferente velocidad, lo cual sólo es soportable por un fluido sin viscosidad, y recibe el nombre de capa de cortadura<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup>En las capas de cortadura la viscosidad cobra importancia frente a la inercia, como consecuencia de los elevados gradientes de velocidad. El flujo resulta inestable y se arrolla sobre sí mismo formando torbellinos que crecen de tamaño. Tales torbellinos degeneran la energía cinética en calor. Su efecto mecánico es el de suavizar la diferencia de velocidad progresivamente corriente abajo, hasta que en el infinito corriente abajo, la estela desaparece diluida en el fluido que le rodea.

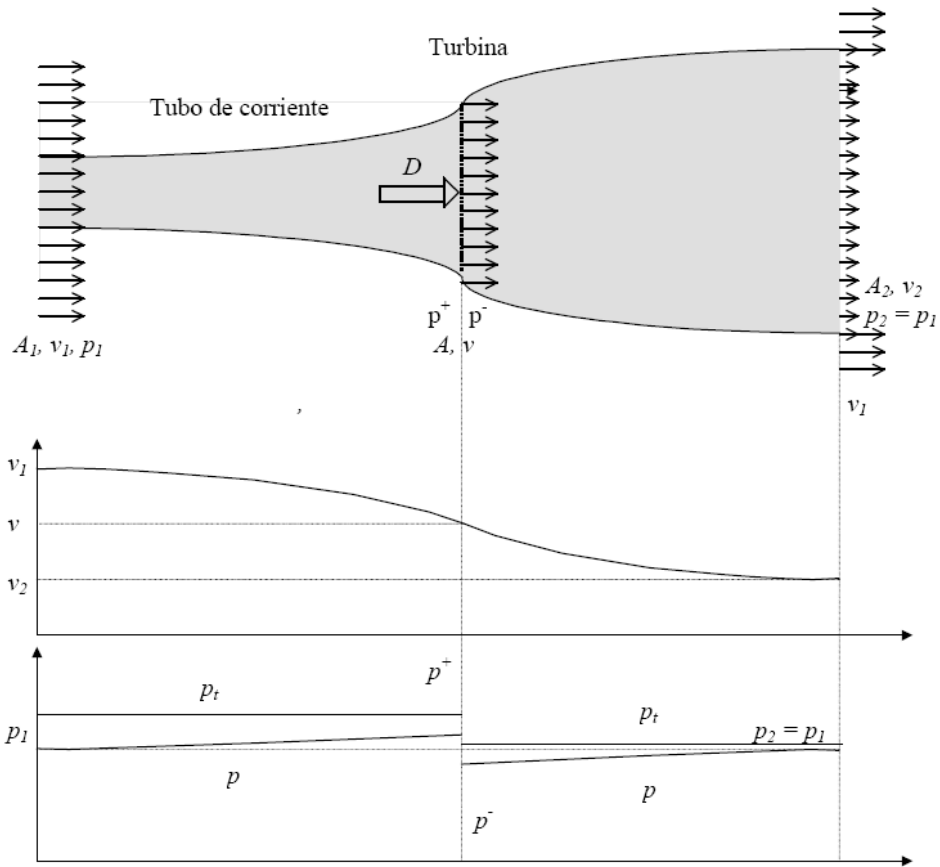


Figura 27. Esquema del campo fluido usado para la obtención del límite de Betz y evolución resultante de las magnitudes fluidas. Obsérvese que el salto en  $p$  coincide con el salto en  $p_t$ . Se ha exagerado la curvatura de la superficie de corriente límite. Fuente: Arias Vega, 2006



### Ecuaciones:

- **Continuidad de la masa:** El caudal másico  $\dot{m}$  se ha de mantener a lo largo del tubo de corriente. Como tan sólo la velocidad axial contribuye a él,  $\dot{m} = \rho A_1 v_1 = \rho A v = \rho A_2 v_2$ , resultando:

$$v_1 A_1 = v A = v_2 A_2 \quad (25)$$

- **Continuidad de movimiento:** La fuerza del disco sobre el fluido con el sentido de la corriente  $-D$  tiene que igualar la diferencia de flujos de cantidad de movimiento entre la salida y la entrada del tubo de corriente, secciones 2 y 1.

$$D = -\dot{m}(v_2 - v_1) = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (26)$$

- **Energía:** Corresponde a la aplicación de Bernoulli entre  $A_1$  y  $A$ , y entre,  $A$  y  $A_2$ :

$$p^+ + \frac{1}{2} \rho v^2 = p + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (27)$$

$$p^- + \frac{1}{2} \rho v^2 = p + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (28)$$

- **Equilibrio del disco:** El disco está estático, luego la suma de fuerzas sobre él debe ser nula, entonces:

$$D = (p^+ - p^-) A \quad (29)$$

Restando miembro a miembro las ecuaciones (27) y (28) obtenemos una expresión del salto de presiones a través del disco:

$$p^+ - p^- = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) \quad (30)$$

Igualando las expresiones de la resistencia aerodinámica que dan la (26) y la (29), obtenemos una expresión en la cual podemos introducir el valor de la diferencia de presiones recién obtenida:

$$\rho Av(v_1 - v_2) = (p^+ - p^-)A = \frac{1}{2} \rho(v_1^2 - v_2^2) \quad (31)$$

Simplificando resulta:

$$v = \frac{v_1 - v_2}{2} \quad (32)$$

Esta ecuación nos indica que la velocidad inducida en el infinito aguas abajo es el doble que en el plano del disco, lo cual indica, efectivamente, el tubo de corriente tiene que duplicar su área aguas abajo del disco, como cualitativamente postulamos anteriormente. Esto se ve más claramente si introducimos el parámetro adimensional “a”, generalmente positivo, que mide el defecto de velocidad:

$$v = (1 - a) \quad (33)$$

Resultando:

$$v_2 = v_1(1 - 2a) \quad (34)$$

La potencia extraída de la corriente proviene, como hemos argumentado, de la diferencia de presión entre ambas caras del disco. Recordando que el trabajo elemental producido por una diferencia de presión  $\Delta p$  en una superficie que avanza un diferencial de recorrido  $ds$  es  $\Delta p A ds$ , la potencia realizada es  $\Delta p A ds/dt = \Delta p A v$ , siendo  $v$  la velocidad de avance del émbolo. Si suponemos ahora que el viento local está en calma y es el disco el que avanza, la potencia necesaria para moverlo es:

$$P = (p^+ - p^-)Av = Dv \quad (35)$$

Que ha de coincidir con la potencia extraída de la corriente en nuestro caso.

Sustituyendo el valor de la diferencia de presiones dado por (30) obtenemos:

$$P = \frac{1}{2} \rho(v_1^2 - v_2^2)Av = \dot{m} \frac{1}{2} \rho(v_1^2 - v_2^2) \quad (36)$$

Esta expresión nos indica que la potencia extraída es igual a la diferencia de flujo de energía cinética entre entrada y salida (en las cuales la presión es la misma), lo cual

es correcto desde el punto de vista de la conservación de la energía. Sustituyendo en esta expresión el valor de  $v_1$  y  $v_2$  como funciones de “a” obtenemos (m depende de “a”):

$$\frac{P}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 A} = 4a(1 - a)^2 = C_p \quad (37)$$

El cociente entre la potencia obtenida y la disponible en la corriente a través del área frontal de la turbina es lo que se conoce como coeficiente de potencia  $C_p$  y es una función de “a” representada en la Figura 28., y que presenta un máximo dado por:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)^2 - 8a(1 - a) = 0 \rightarrow a = 1/3; C_{p\text{máx}} = 16/27 \approx 0.5926 \quad (38)$$

Esto nos da el pretendido límite de Betz, que indica que tan sólo aproximadamente el 60% de la energía contenida en el viento es convertible en energía disponible en la turbina. Esto se obtiene retardando un 33% la corriente en el disco y un 66% en la estela.

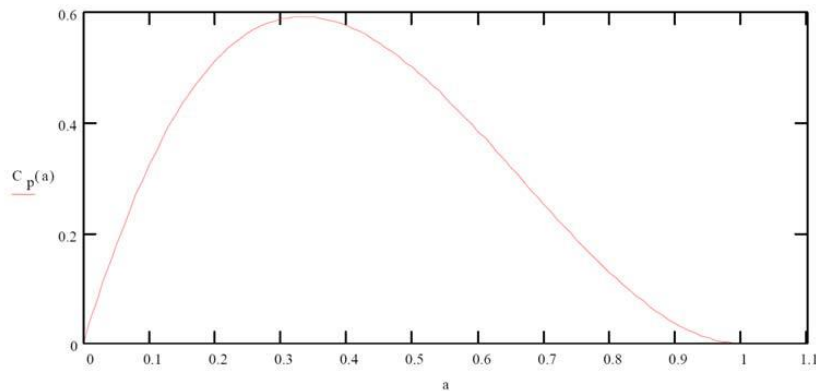


Figura 28. Coeficiente de potencia de una aeroturbina por el modelo de cantidad de movimiento como función del parámetro de porosidad de a.  
Fuente: Arias Vega, 2006

El coeficiente de resistencia, denominado también coeficiente de tracción  $C_T$ , viene dado por:

$$C_D = C_T = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v_1^2 A} = 4a(1 - a) \quad (39)$$

Si particularizamos para potencia máxima resulta ser:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v_1^2 A} = \frac{8}{9} \quad (40)$$

Esto demuestra que es necesario aplicar un valor próximo a la presión dinámica ( $C_D=1$ ) de la corriente sobre la superficie del rotor para conocer la carga de empuje aerodinámico sobre la aeroturbina en el punto de máxima extracción de potencia. Este valor es netamente inferior al coeficiente de resistencia aerodinámica de una placa plana circular impermeable perpendicular al viento, del orden de 1.5 a 2.

Los experimentos realizados con rotores de helicóptero han permitido obtener datos precisos de la validez de la teoría de cantidad de movimiento, pues el ensayo de aeroturbinas es complicado y costoso. Los resultados demuestran que proporciona valores razonablemente buenos hasta  $a=1/2$ , a partir del cual predice un descenso de tracción que no se materializa. Más bien, ésta sigue aumentando y se entra en un régimen de alta turbulencia en el rotor y en la estela. Para valores negativos de “a” entramos en el régimen de hélice propulsora, comunicándose potencia a la corriente, siendo aplicable con buenos resultados la teoría de cantidad de movimiento.

Esta teoría no proporciona información que permita directamente obtener reglas de diseño. Es necesario realizar un análisis más profundo.

Otra consecuencia de este estudio es que un anemómetro instalado en la propia turbina medirá una velocidad menor que la que existe en la corriente libre. Sin embargo, la aceleración que imprime la góndola al flujo de su derredor puede compensar este efecto, al menos parcialmente. Es necesario recurrir a un calibrado directo comparando las medidas del anemómetro con las de la corriente sin perturbar, para varios estados operativos de la

turbina, lo que significa varios valores de “a”. Alternativamente, es posible aproximar el calibrado usando una simulación numérica del flujo detallado alrededor de la góndola y tras el rotor.

### d.3.2. Teoría del Momento Cinético

Anderson [10], establece que, la teoría de cantidad de movimiento, al considerar equilibrios en un flujo idealizado en un plano, no es capaz de predecir el par  $Q$  sobre las palas. La ecuación de equilibrio de Newton establece que debe existir una reacción en el aire que atraviese el rotor que compense el par aerodinámico sobre el rotor. Más precisamente, esta reacción solamente puede manifestarse como un cambio en el momento (par) de la cantidad de movimiento de la corriente con respecto al mismo eje que el par. Si la corriente es colineal con el eje de la turbina, tras su paso por el rotor debe de adquirir bruscamente un giro medio alrededor del eje con sentido contrario al del par ejercido y de magnitud dada por el flujo del momento tomándolo con respecto al eje de la corriente. La única componente de la velocidad capaz de dar momento es  $v_\theta$ , es decir la componente tangencial en un sistema de coordenadas cilíndrico  $(r, \theta, z)$  coincidiendo el eje  $z$  con el de giro de la máquina. Como en la teoría de cantidad de movimiento, podemos suponer que esa velocidad tangencial tiene uniformidad tangencial, es decir, que  $v_\theta$ , no depende de  $\theta$ . Pero admitamos que varía linealmente con  $r$  por efecto de variar linealmente con el radio la velocidad de avance de la pala  $v_p = \Omega r$ . podemos entonces admitir un coeficiente de inducción tangencial  $a'$  que mide la velocidad angular impartida a la corriente  $\omega$  como una fracción de la velocidad angular de giro del rotor  $\Omega$ :

$$a' = \frac{\omega}{\Omega} = \frac{v_\theta/r}{v_p/r} \quad (41)$$

Apliquemos la ecuación de conservación del momento cinético, llamada también de equilibrio radial o de Euler, aun volumen de control<sup>6</sup> constituido por una sección

---

<sup>6</sup>Un volumen de control es un volumen, real o imaginario, en este caso invariable con el tiempo, tomado para controlar las magnitudes fluidas. En este caso tiene dos fronteras permeables a la masa, que son la entrada y la salida. Tiene otra superficie que es una superficie de corriente, es decir, que la velocidad del fluido es

transversal  $dA$  antes del rotor con forma de corona circular de radio  $r$  y espesor  $dr$ , el tubo de corriente anular que pasa por su perímetro exterior e interior y la sección transversal  $dA$  resultante inmediatamente aguas abajo. Justo aguas arriba del rotor, la corriente carece de componente tangencial de la velocidad y justo aguas abajo  $v_\theta$  de valor medio. El diferencial de par  $dQ$  aplicado por los elementos de pala<sup>7</sup> entre  $r$  y  $r+dr$  sobre el fluido, viene dado por el flujo de momento de cantidad de movimiento. Este flujo es el producto del flujo másico  $d\dot{m}$  por el momento del vector velocidad, el cual es  $rv_\theta$ .

$$\left. \begin{array}{l} \text{Equilibrio radial: } dQ = v_\theta r d\dot{m} \\ \text{Caudal másico: } d\dot{m} = \rho v dA \\ dA = 2\pi r dr \\ v = v_1(1 - a) \\ a' = \frac{v_\theta}{\Omega r} \end{array} \right\} \rightarrow Q = 2\pi r^3 \rho v_1 (1 - a) a' \Omega dr \quad (42)$$

En esta expresión puede observarse como el par inducido es directamente proporcional al coeficiente  $a'$ .

En esta expresión puede observarse que las rebanadas de pala más cerca de su punta contribuyen mucho más al par que las próximas al buje por la dependencia con  $r^3$ , con  $a$  y  $a'$  constantes.

Como la potencia es el producto del par por la velocidad angular de su desplazamiento, el diferencial de potencia producido por el elemento de pala anterior es:

$$dP = \Omega dQ \quad (43)$$

La integración a lo largo de la pala y la suma a la totalidad de las palas daría el par y potencia obtenidos. Sin embargo, se desconocen tanto  $a$  como  $a'$ , siendo necesario recurrir a modelos más detallados para obtener su valor.

---

tangente a ella, por lo que no la atraviesa. Esa superficie de corriente puede ser doble, pues el tubo que forma el volumen de control es hueco. Por lo tanto, hay una superficie de corriente exterior y otra interior.

<sup>7</sup>Se entiende por elemento de pala a la rodaja obtenida en la pala entre  $r$  y  $r+dr$ . La forma obtenida se denomina perfil de la pala en ese radio. Es difícil asumir de entrada que  $v_\theta$  sea uniforme según  $\theta$  justo detrás de los perfiles. Sin embargo, la teoría de turbomáquinas demuestra que se uniformiza muy pronto aguas abajo, incluso con un número reducido de palas, salvo cerca de las puntas. Como se verá, cerca de las puntas el efecto de las palas tiene que descender hasta anularse al llegar a la punta misma, con lo que no resulta preocupante este hecho

Estos modelos pueden aceptar que tanto  $a$  como  $a'$ , sean funciones del radio. Esto es permisible por el muy elevado número de Reynolds del flujo, que permiten que existan gradientes radiales de velocidad (en este caso moderados) axial y tangencial, sin que la viscosidad se oponga a ello de forma apreciable. Esto contrasta con la teoría de cantidad de movimiento antes expuesta, donde se asumía que  $a$  (y con ello la velocidad axial) era constante en la superficie del disco. Sin embargo, en virtud de esta ausencia de interacción entre capas concéntricas o tubos de corriente anulares concéntricos, esta teoría unidimensional puede aplicarse, sin modificación, a un elemento anular de área diferencial  $dA$  entre  $r$  y  $r+dr$ .

El efecto de la rotación de la estela es una reducción en la energía extraíble pues la rotación resulta no aprovechable con este tipo de turbina que no tiene estator tras el rotor. En definitiva, se convierte parte de la energía cinética incidente, puramente axial, en energía cinética de giro<sup>8</sup>.

### **d.3.3. Teoría Turbillonaria**

La rotación de la estela y el frenado de la corriente, antes descritos, se manifiestan físicamente con un sistema de torbellinos<sup>9</sup> ligados a las palas, que se desprenden de ellas por el buje y por la punta de las mismas y tras desprenderse quedan libres, siendo arrastrados por la corriente, tal y como muestra la Figura 29.

---

<sup>8</sup>Este giro es convertible en aumento de presión con un estator que endereza la corriente, pero no se usa en turbinas eólicas. Ello se debe a que el giro en la corriente es pequeño y el coste de colocar un estator muy elevado. Además, su exposición a las tempestades haría a las turbinas más vulnerables.

<sup>9</sup>Un torbellino es una estructura fluida consistente en un núcleo turbillionario (donde el fluido gira rápidamente) que hace girar al fluido en su derredor. Induce pues una velocidad de giro. El efecto del torbellino se nota hasta el infinito, pero con un influjo en la velocidad de giro que decae con el inverso de la distancia al núcleo, la inducción en el infinito es nula. Se suelen idealizar como constituidos por filamentos sin espesor en cuyo interior radica el efecto turbillionario. Éste se cuantifica con la llamada circulación del fluido alrededor del hilo. Es la integral de la proyección del vector velocidad sobre una curva cerrada que encierre el hilo. Si el flujo es bidimensional, basta con estudiar un plano perpendicular a él, en el cual se desarrolla el movimiento. Los torbellinos resultan perpendiculares al plano del movimiento y por ello los ideales son representables con un punto alrededor del cual gira el fluido. Los torbellinos no pueden acabar en el seno de un flujo estacionario, salvo que se admita la presencia de viscosidad que los disipe.

Los torbellinos resultan físicamente semejantes a lo que ocurre con los hilos conductores que llevan intensidad eléctrica. Inducen a su alrededor un campo magnético giratorio, semejante a la velocidad del fluido en nuestro caso. No obstante en nuestro caso la situación es más compleja, pues los torbellinos libres son como hilos conductores de la electricidad que no tuvieran masa ni rigidez alguna y que por tanto respondieran al campo electromagnético que ellos mismos generan.

La teoría de la aerodinámica de perfiles sustentadores demuestra que éstos son sustituibles por un torbellino colocado en su interior, llamado torbellino ligado. Por ello el perfil tiene embebido un torbellino en su interior, que une el que se libera en la punta con el que se libera en el buje.

Los torbellinos libres son arrastrados por la corriente y debido a que la corriente gira tras el plano de movimiento de las palas describen trayectorias helicoidales, tal y como muestra la Figura 29.

Los torbellinos no son una mera idealización matemática, antes bien son perfectamente visibles, si por algún motivo, la depresión que se genera en su núcleo produce la condensación del vapor de agua atmosférico formando gotas. Son muy frecuentemente visibles los que se desprenden del borde marginal de las alas de los aviones durante su vuelo cerca del suelo.

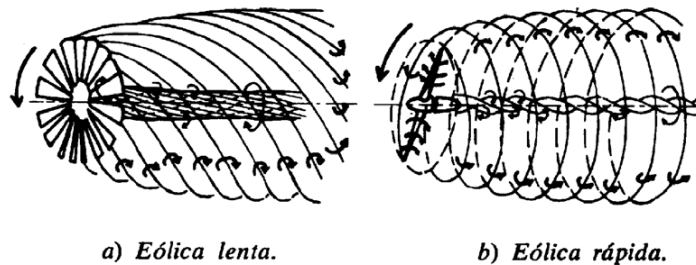


Figura 29. Sistema de torbellinos desprendidos en punta y raíz de pala en turbinas de eje horizontal  
Fuente: Arias Vega, 2006

#### **d.3.4. Teoría del Elemento de Pala**

Hasta ahora hemos obtenido, por una parte, expresiones globales para el disco poroso, como idealización del rotor. Por otro lado, conocemos el comportamiento de un perfil aerodinámico frente a una corriente uniforme en configuración 2D. Un siguiente paso es expresar las acciones aerodinámicas de una pala en función del comportamiento de los perfiles que la forman y hacerlo coincidir con el comportamiento global anteriormente obtenido.

Ser verá que idealizando el rotor por reducir la cuerda de sus palas a cero y llegando a hacer infinito el número de palas y, además, suponiendo que sus perfiles carecen de resistencia



aerodinámica se obtiene un nuevo límite superior al coeficiente de potencia, denominado límite de Glauert. Incorpora la pérdida por el giro de la corriente tras el rotor y por lo tanto es más realista que el límite de Betz.

La teoría del elemento de pala se basa en que es posible construir la acción de la pala entera como suma de la acción independiente de rebanadas entre  $r$  y  $r+dr$ . Desde su raíz hasta su punta.

La Figura 30., muestra un elemento de pala, resultado de rebanar la pala a una distancia  $r$  y  $r+dr$  del eje. Se observa que la velocidad relativa al perfil  $w$ , correspondiente a la corriente incidente, medida en unos ejes giratorios con la pala, resulta de restar la velocidad del viento local  $v$ , con la dirección axial, la velocidad de arrastre que es la debida al giro de la pala  $v_p = \Omega r$ , la cual es lineal con  $r$ .

$$\vec{w} = \vec{v} - \vec{v}_p; \vec{v} = (v)\vec{i}_z; \vec{v}_p = (\Omega r)\vec{i}_\theta \quad (44)$$

Por lo tanto, al ser perpendiculares entre sí, la velocidad del viento y la velocidad de arrastre, y por estar ambas en un plano  $r=cte.$ ,  $w$  está asimismo en un plano  $r=cte.$

El perfil reacciona a la corriente relativa a él  $w$ , como cualquier cuerpo en movimiento en el seno de un fluido.

Lo dicho implica que:

$$\begin{aligned} w^2 &= v^2 + v_p^2 \\ v &= v_1(1 - a) \\ v_p &= \Omega r(1 + \frac{a'}{2}) \end{aligned} \rightarrow \begin{aligned} w &= \sqrt{v_1^2(1 - a)^2 + \Omega r(1 + \frac{a'}{2})^2} = \frac{(1 - a)v_1}{\text{sen}\Phi} \\ \tan\Phi &= \frac{(1 - a)v_1}{\Omega r(1 + \frac{a'}{2})} = \frac{1}{\lambda(r)(1 + \frac{a'}{2})} \end{aligned} \quad (45)$$

Donde se han introducido las inducciones axiales y tangenciales obtenidas de las teorías de cantidad de movimiento y de momento cinético, pero ahora siendo constante solo entre  $r$  y  $r+dr$ . Por lo tanto  $a=a(r)$  y  $a'=a'(r)$ .

Se debe notar que en la expresión de la velocidad de arrastre  $v_p$  conste  $a'/2$  en lugar de  $a'$ . El motivo radica en la discontinuidad de  $v_\theta$  a través del disco. Justo delante de él es nula y justo detrás tiene un cierto valor que vendrá dado por el efecto de las palas. Debido a que el perfil se puede suponer que origina este salto, es lógico, y resulta acertado sobre la base de la teoría turbillonaria, que la velocidad tangencial inducida en el perfil sea la media de la que existe justo delante y justo detrás.

$\Phi$ : Ángulo de la corriente, medido con referencia al plano de giro.

$\theta$ : Ángulo de calado o de asiento del perfil, formado por el segmento de su cuerda y el plano de giro.

$i$ : Ángulo de incidencia cordal del perfil, es decir, medido con respecto a su cuerda.

$i$ :  $\Phi - \theta$ .

$\alpha$ : Ángulo de ataque del perfil.  $\alpha = i + \alpha_o$ .

$\lambda(r) = v_p/v$ : Rapidez local de la pala.

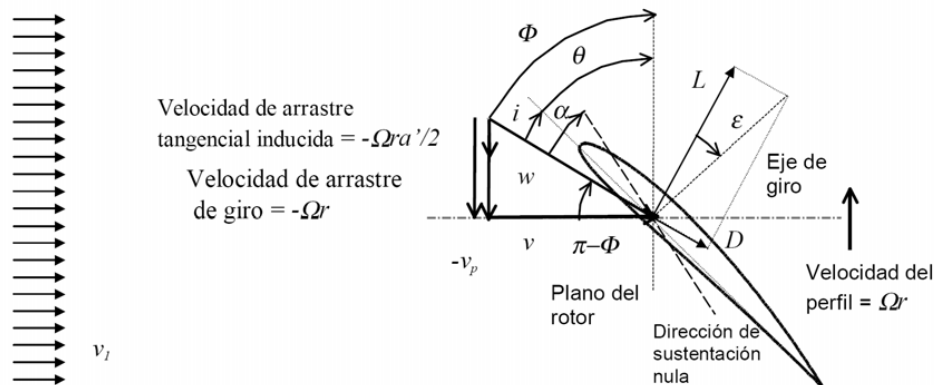


Figura 30. Triángulo de velocidades de un elemento de pala situado a distancia  $r$  del eje.  
 Fuente: Arias Vega, 2006

- A igualdad de ángulo de ataque  $\alpha$  y cuerda  $c$  se obtiene más sustentación en los perfiles de la punta habida cuenta de una mayor velocidad relativa incidente  $w$ . para compensar este efecto la cuerda cerca de la punta suele ser menor que cerca del centro. Caso de no serlo se obtienen pérdidas elevadas fuera del punto de diseño.

- El ángulo de calado de los perfiles  $\theta$  ha de disminuir con el radio para obtener un cierto ángulo de ataque  $\alpha$ , pues la tangente de  $\Phi$  es inversamente proporcional a  $r$ . Esto se conoce como alabeamiento o torsión de la pala, lo cual complica su construcción. Las palas sin torsión, denominadas planas, originan elevadas pérdidas.

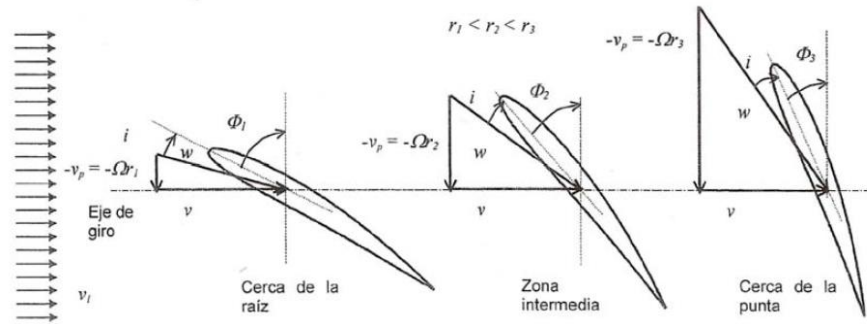


Figura 31. Composición de velocidades medias a tres radios.

La figura muestra que es necesaria torsión en la pala para mantener la incidencia del perfil. Las variables que se mantienen a lo largo del radio no tienen subíndice.

Fuente: Arias Vega, 2006

- El ángulo de la corriente  $\Phi$  es proporcional a  $v$ , justificando la conveniencia de un aumento del ángulo de asiento al disminuir  $\lambda$ , aumentando el paso del rotor. Esto ocurre si la turbina actúa a régimen fijo y aumenta la velocidad del viento.

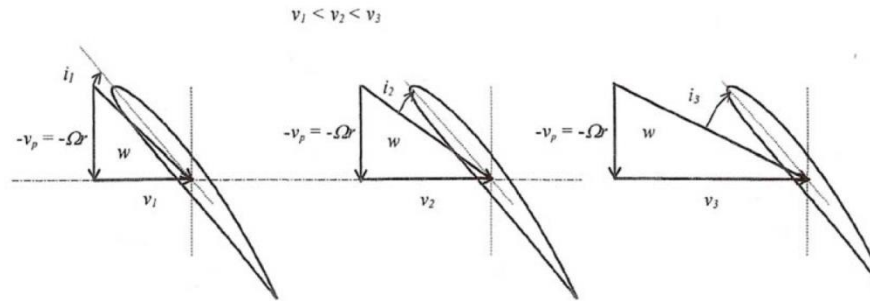


Figura 32. Aumento del ángulo de incidencia al aumentar la velocidad del viento (dando lugar a un aumento de  $v$ ) para una aeroturbina de paso fijo.

La sección corresponde a un radio intermedio entre raíz y punta.

Fuente: Arias Vega, 2006

- Cuanto más rápida es girando la turbina más esbeltas se pueden construir las palas pues su cuerda puede disminuirse para un radio determinado. Ello redundará en la eficiencia de la máquina al reducir el giro corriente abajo.

Observando la misma figura se puede deducir que al avanzar el perfil en la misma dirección que la sustentación  $L$  (la cual es perpendicular a la corriente incidente) su contribución al

par es la proyección de ella sobre el plano del disco, habiendo de restarle la componente sobre el mismo plano debida a la resistencia D. De aquí la gran importancia de utilizar perfiles de elevada eficiencia aerodinámica, dada por la relación  $\varepsilon=L/D=C_L/C_D$ , la cual alcanza su máximo para un ángulo de ataque determinado. Escribamos las expresiones de la tracción, par y potencia del elemento de pala:

$$dT = \frac{1}{2} \rho w^2 (C_L \cos \Phi + C_D \sin \Phi) c N dr = \frac{1}{2} \rho w^2 C_N c N dr \quad (46)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho w^2 (C_L \sin \Phi + C_D \cos \Phi) c N r dr = \frac{1}{2} \rho w^2 C_T c N r dr \quad (47)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho w^2 (C_L \sin \Phi + C_D \cos \Phi) c N \Omega r dr = \frac{1}{2} \rho w^2 C_N c N \Omega r dr \quad (48)$$

Donde:

- $C_N$  y  $C_T$ : respectivamente coeficientes de fuerza normal y en el plano del disco, función de  $r$ .
- $N$ : número de palas, típicamente es decreciente con la rapidez global  $\lambda$  que se define como el cociente entre la velocidad de giro de la punta de la pala y la velocidad del viento en el infinito aguas arriba:

Tabla 4. Valores típicos del número de palas como función de la rapidez de las turbinas.

$\lambda$	N
1	8 a 24
2	6 a 12
3	3 a 6
4	2 a 4
$\geq 5$	3, raramente 2 o 1

- Tanto  $c$  como  $w$  son funciones de  $r$ .

El paso de una hélice  $H$  y en general de un objeto que describa un movimiento helicoidal con respecto al medio en el que se desplaza, es igual al avance que realiza en una vuelta al

avanzar con respecto a un medio. En nuestro caso el paso no tiene por qué ser constante en cada vuelta, pues depende del calado de los perfiles en cada radio, el cual depende del tipo de perfil, la cuerda que se disponga y de las velocidades inducidas localmente. Sin embargo, se suele denominar paso al avance de la cuerda del perfil al 70% del radio externo:  $H = (2\pi R) \tan(\theta_{0,7})$ .

$dT$  y  $dQ$  obtenidos por los  $N$  elementos de pala pueden identificarse con un  $dT$  y  $dQ$  respectivamente obtenidos con la teoría de cantidad de movimiento y de momento cinético para la rebanada entre  $r$  y  $r+dr$ . Esto supone despreciar las heterogeneidades acimutales, lo cual sugiere la existencia de infinito número de palas de cuerda nula, de tal manera que  $cN$  es finito. Estas igualdades nos permiten obtener una expresión para el coeficiente de potencia como función de  $a$ . Derivando e igualando a cero es posible obtener la configuración óptima del rotor local, la cual puede extenderse a otros radios haciendo lo mismo. El rotor resultante tienen un coeficiente de potencia máximo que representado como función de la rapidez de la turbina se presenta en la Figura 33. Se observa en ella que:

- Los perfiles de eficiencia aerodinámica infinita, es decir, sin resistencia aerodinámica, describen la curva de Glauert.
- La curva de Glauert tiende al límite de Betz asintóticamente para rapidez infinita, para la cual el par ejercido es nulo y, por tanto, nulo el giro de la corriente aguas abajo del disco. Esto justifica la conveniencia de las turbinas rápidas, con par pequeño y alta velocidad de giro.
- A rapidez elevadas es importante instalar perfiles de elevada eficiencia, pues el coeficiente de potencia es muy sensible a ella. Esto justifica el instalar perfiles delgados y bien perfilados en la punta de pala.
- Los perfiles de elevada eficiencia rinden elevados coeficientes de potencia en un rango amplio de rapidez, disminuyendo este rango al disminuir la eficiencia.
- Si un perfil actúa a un ángulo de ataque distinto del óptimo, es decir, el que maximiza  $(C_L/C_D)_{\text{máx}}$ , se pierde coeficiente de potencia. Esto ocurre cuando el paso de la pala no es el correcto para el régimen de giro y de velocidad del viento existentes. También ocurre localmente si la torsión de la pala no es la adecuada, aún

actuándose al paso que optimice  $C_p$ , pueden existir perfiles para los cuales no se esté en el ángulo de ataque óptimo.

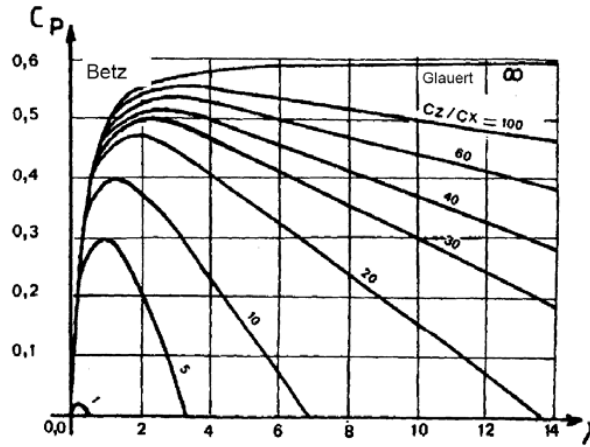


Figura 33. Coeficientes de potencia máximos para infinito número de palas como función de la rapidez local de la pala  $\lambda(r)$ .  
 $C_z=C_L, C_x=C_D$ .  
 Fuente: Arias Vega, 2006

Prandtl propuso corregir el coeficiente de potencia, obtenido con la teoría más arriba expuesta, por el efecto de número finito de palas  $N$  con un coeficiente aproximado  $\eta_p$ :

$$\eta_p = (1 - 0.93/N\sqrt{\lambda^2 + 0.445})^2 \quad (49)$$

Tiene en cuenta la concentración de vorticidad en los perfiles y en el torbellino desprendido de la punta de la pala.

Resulta ilustrativo estudiar el resultado de estos modelos al variar el número de palas. La Figura 34., nos muestra cómo se obtiene muy poca diferencia al reducir 4 palas a 3, lo cual justifica la práctica inexistencia de aeroturbinas rápidas de 4 palas, pues el costo de una pala es apreciable, el peso sobre la torre aumenta y la ganancia resulta ser marginal. La mayor diferencia al reducir 3 palas a 2 hace que ello solo sea justificable en aeroturbinas de gran tamaño, por consideraciones de costo. Sin embargo, la tendencia más reciente a instalar 3 palas incluso en las turbinas de gran tamaño, por su mejor coeficiente de potencia y menores vibraciones<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> Una aeroturbina de 3 palas muestrea mejor el viento que una de 2. Como el viento no es uniforme a lo largo de la trayectoria circular de la pala, se obtienen fluctuaciones de par y con ello de potencia eléctrica instantánea. En consecuencia 3 palas promedian mejor el viento que 2 y el resultado es una marcha más suave

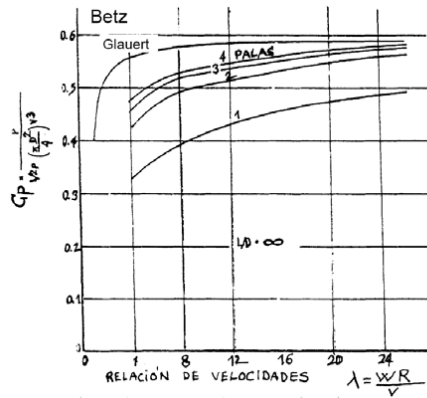


Figura 34. Coeficiente de potencia para aeroturbinas con distinto número de palas como función de la rapidez (coeficiente de velocidad) y para perfiles sin resistencia aerodinámica. Comparación con la curva de Glauert y el límite de Betz. Fuente: Arias Vega, 2006

### Efectos no estacionarios:

- Por un lado aparecen efectos de la historia. Quiere esto decir que cuando una pala aumenta su ángulo de ataque porque el viento local es mayor (por ejemplo cuando está en la parte alta de la vuelta), la sustentación es mayor. Esto significa que el torbellino ligado al perfil tienen una circulación mayor. Este aumento solo es posible desprendiendo un torbellino, el cual, al alejarse induce velocidades a tener en cuenta.
- Por otro lado, aparecen histéresis. Este fenómeno viene originado por la proximidad a la pérdida con que a menudo actúan las palas. Cuando la entrada en pérdida se produce, al disminuir el ángulo de ataque posteriormente, tarda el perfil en recuperar su situación de flujo laminar.

La entrada en pérdida en condiciones dinámicas es un proceso complejo, que solo es abordable con teorías complejas, que si bien son bien conocidas, su uso demanda una tarea de cálculo muy grande.

---

y menos cargas sobre la estructura. En contrapartida, las aeroturbinas de 2 palas pueden construirse con un rotor de una sola pieza, articulado en el buje, lo cual hace que no se transmitan tanto las cargas al buje. Debido a estas ventajas y al menor precio, todavía algunos constructores prueban el diseño de 2 palas. Incluso existen prototipos de 1 sola pala, llamados monópteros. El peso de la pala es contrarrestado con un contrapeso.

La entrada en pérdida supone una disminución de sustentación que descarga la pala. Dado que éstas suelen ser relativamente flexibles, esto supone un movimiento que incide en el ángulo de ataque. Aparece pues un acoplamiento estructural-aerodinámico importante, que complica el cálculo.

A pesar de estas limitaciones, las teorías cuasi estacionarias, a veces complementadas con datos experimentales de entrada en pérdida de perfiles y con análisis de vibraciones, se usan ampliamente en el diseño de palas de aerogenerador. Los perfiles aerodinámicos usados recientemente están optimizados, teniendo en cuenta la entrada en pérdida y su dinamismo.

### **d.3.5. Perfiles Aerodinámicos**

#### **Principio de Funcionamiento:**

Anderson [10] postula que el aumento de velocidad del aire sobre el extradós de un perfil, respecto a la velocidad del aire en el intradós, genera una diferencia de presiones, entre ambas superficies del perfil. Si esta diferencia de presiones es diferente de cero, ya sea positiva o negativa, y al estar actuando sobre las superficies del perfil, genera una fuerza resultante denominada levantamiento o sustentación. Si la línea de sustentación nula es paralela a la dirección del viento incidente, como es lógico no se producirá sustentación.

Si se incrementa el ángulo de ataque las presiones en el extradós son inferiores a las del intradós, obteniéndose una fuerza resultante en dirección vertical y hacia arriba llamada sustentación. El punto donde se puede considerar aplicada esta fuerza se denomina centro de presión. (Figura 37).

Anderson señala que las fuerzas aerodinámicas sobre un cuerpo son debidas únicamente a dos fuentes:

1. La distribución de presiones sobre la superficie del cuerpo ( $p$ ).
2. La distribución de esfuerzos cortantes sobre la superficie del cuerpo ( $\tau$ )



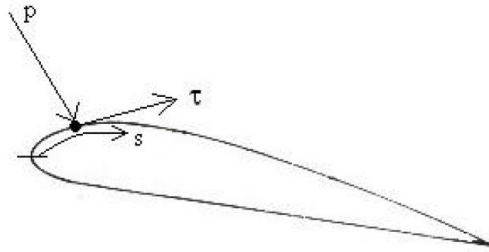


Figura 35. Distribución de presiones y esfuerzos cortantes sobre un perfil aerodinámico.

Como muestra la figura 35,  $p$  actúa normal a la superficie, y  $\tau$  actúa de forma tangencial a la superficie. El efecto total de las variables mencionadas, integradas sobre el perfil resulta en una fuerza total aerodinámica, algunas veces llamada fuerza resultante que puede ser dividida en dos componentes, que son la sustentación (provocada por la distribución de presiones) y la resistencia al avance (provocada por la distribución de esfuerzos cortantes). El levantamiento o sustentación actúa de forma perpendicular al viento relativo. La resistencia al avance es la fuerza paralela al viento relativo que se opone al movimiento de un perfil en un flujo.

Muchos factores contribuyen al levantamiento total generado por un perfil. El incremento de velocidad causa un aumento de sustentación debido a la diferencia de presiones entre el extradós y el intradós. La sustentación se incrementa con el cuadrado de la velocidad. Normalmente, un aumento de la sustentación generará un aumento en el arrastre o resistencia. Por lo tanto, cuando se diseña un perfil se toman en cuenta todos estos factores y se diseña para que éste tenga el mejor desempeño.

### **Diseño:**

Ni la teoría de la cantidad de movimiento ni la del momento cinético nos proporcionan ni nos demandan información alguna sobre la geometría de la pala ni sobre el número de ellas. Es necesario recurrir a estudios más detallados.

Una primera idea es aproximar el flujo alrededor de las palas esbeltas (radio del rotor  $\gg$  ancho de la pala) a aquel que existiría si su ancho fuera infinitesimal con respecto al radio, por lo tanto resultando el flujo bidimensional plano en una sección a distancia constante del eje  $r=\text{cte.}$  (constante). El corte de una pala con una superficie  $r=\text{cte.}$  es lo que se denomina perfil de la pala. Debido a que las palas de las turbinas rápidas no son muy anchas y,

además, son esbeltas, esta sección es prácticamente plana. No lo es cerca del buje, pero en esta zona la actividad aerodinámica útil es baja<sup>11</sup>.

El empleo de secciones de las palas con forma de perfil de ala ha demostrado proporcionar elevados coeficientes de potencia. Los perfiles usados siguen la tecnología aeronáutica de perfiles de alas y hélices de baja velocidad, si bien recientemente se han desarrollado perfiles específicos para turbinas de viento<sup>12</sup>.

La forma adecuada a velocidades subsónicas sigue unas líneas generales (ver Figura 36.) consistentes en:

- Un borde enfrentado a la corriente, denominado borde de ataque o borde de entrada, redondeado y de forma lisa y suave. Esta forma permite al perfil actuar con elevado rendimiento a distintos ángulos de orientación de la corriente.
- Un borde en el extremo de sotavento, denominado borde de fuga o borde de salida, afilado. Esta forma tiene por objeto evitar que la corriente le rodee, salvo con un desprendimiento intenso<sup>13</sup>. Dirige la corriente y permite reducir la resistencia al avance.
- La cuerda del perfil de longitud  $c$ , que es la línea recta que une el borde de ataque con el de fuga.
- Una línea de curvatura media o línea media, equidistante entre ambos lados del perfil. El extradós es el lado más convexo y el intradós el menos, pudiendo llegar a ser cóncavo. La distancia máxima a la cuerda define la curvatura máxima del perfil  $c_{max}$ , la cual suele estar entre el 25% al 50% de la cuerda, comenzando en el borde de ataque. La curvatura máxima usada va de cero (perfil simétrico) a un 15% de la cuerda. La línea de curvatura es normalmente una curva suave, habiéndose empleado arcos de círculo, parábolas y otras curvas más complejas.

---

<sup>11</sup>Cerca del buje el perfil aerodinámico evoluciona hacia un cilindro. Esto se debe a que esta forma resulta más rígida y resistente y para permitir alojar en la raíz del álabe el rodamiento de cambio de paso.

<sup>12</sup>Estos perfiles específicos buscan una alta tolerancia al ensuciamiento, por impacto de insectos y polvo, así como un espesor importante para poder ser así resistentes estructuralmente. También un comportamiento específico al entrar en pérdida y al recuperarse de ella.

<sup>13</sup>El fenómeno de desprendimiento es cuando el aire no fluye suavemente alrededor del perfil, sino que toma un movimiento caótico y turbulento.

- Una distribución de espesor, definido por la distancia entre extradós e intradós. Normalmente es una curva suave que alcanza su máximo  $t_{max}$  entre el 20% y el 40% de la cuerda ( $t$  de “thickness” en inglés). Cuanto más grueso (espeso) es un perfil, mayor resistencia aerodinámica tiene; pero permite una estructura más rígida para soportar las cargas. Los perfiles con curvatura tienen un óptimo de espesor por consideraciones aerodinámicas y de resistencia mecánica.

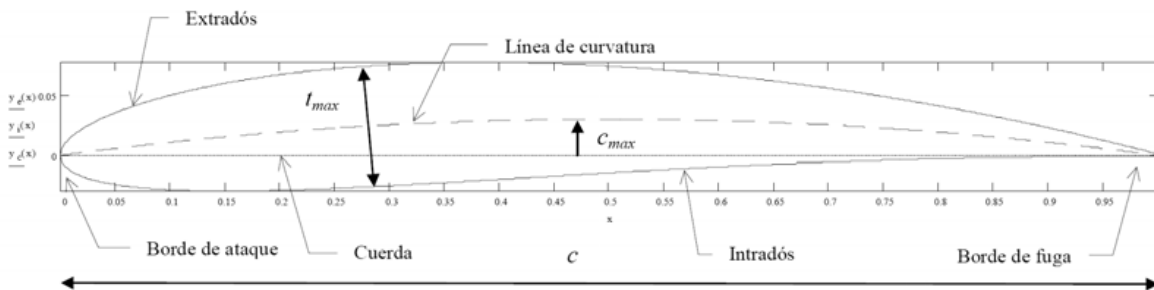


Figura 36. Esquema de la geometría de perfiles aerodinámicos subsonicos  $y_{cmax}$ =máximo de la coordenada de la línea de curvatura  
 $t_{max}$ =espesor máximo.  
 Fuente: Arias Vega, 2006

Las fuerzas aerodinámicas que pueden aparecer sobre un perfil se descomponen en:

- Una componente perpendicular a la corriente incidente en el infinito aguas arriba, denominada sustentación  $L$  (de lift en inglés) y considerada positiva si es hacia el extradós.
- Una componente en la misma dirección y sentido de la corriente incidente sin perturbar, denominada resistencia  $D$  (de drag en inglés). Ver figura 31.

La resistencia aparece siempre, pero la sustentación únicamente si el perfil forma un ángulo de ataque  $\alpha$  con la corriente sin perturbar, es decir, en el infinito corriente arriba. Este ángulo se mide con respecto a la línea de sustentación nula, que es aquella dirección de la corriente relativa al perfil que no provoca sustentación. La línea de sustentación nula forma un ángulo  $\alpha_0$  con la cuerda.

Un perfil simétrico tiene una línea de sustentación nula coincidente con su cuerda, como es lógico en virtud de su simetría. No es así para un perfil con curvatura, antes bien, su línea de sustentación nula pasa por su borde de fuga y por un punto de la línea de curvatura

próximo a su máximo. Puede presentar sustentación una placa plana sin espesor y un perfil simétrico, pero lo hace más adecuadamente un perfil con curvatura y espesor.

Además de las fuerzas aparece un momento de encabritamiento  $M$  que en circunstancias normales tiende a aumentar el ángulo de ataque.

A menudo se usa otro ángulo para describir la orientación frente a la corriente que es el ángulo de incidencia cordal  $i$ , a veces denominado también ángulo de ataque, y está formado por la cuerda (u otra referencia puramente geométrica con lo que no es cordal) y la corriente sin perturbar. Su uso facilita las labores metrológicas y constructivas.

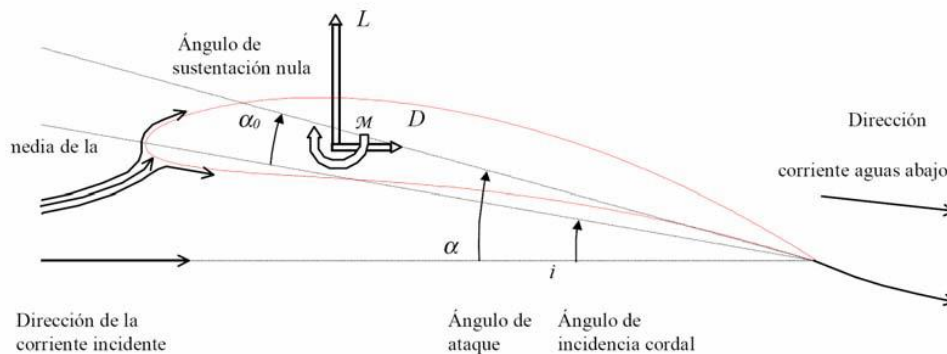


Figura 37. Denominación habitual de los parámetros operativos básicos de perfiles aerodinámicos.

Se muestra la configuración de la corriente próxima al punto de remanso en el borde de ataque cuando no hay desprendimiento. Se muestra como la dirección de la corriente en las proximidades del perfil difiere de la que tiene lejos. Se muestra asimismo la flexión producida en la corriente que es el cambio de dirección de la corriente, desde corriente arriba a corriente abajo.

Fuente: Arias Vega, 2006

Cuando un perfil aerodinámico se enfrenta a la corriente con ángulos de ataque pequeños la corriente le rodea suavemente describiendo un flujo laminar<sup>14</sup> aproximadamente bidimensional, salvo eventualmente en una capa muy delgada junto a la pared, denominada capa límite, donde los efectos viscosos son dominantes y donde puede aparecer turbulencia. Fuera de ella domina la inercia del fluido y por lo tanto podemos aplicar la fórmula de Bernoulli. Por ello podemos comprender que un perfil con ángulo de ataque desarrolle sustentación, por obligar al extradós a una aceleración mayor que el intradós, pues le supone un mayor estrechamiento a su paso. También se puede argumentar que el fluido tiene que recorrer más longitud por el extradós, lo que exige mayor velocidad y por lo tanto

<sup>14</sup>Se dice que un flujo es laminar cuando las líneas de corriente muestran un aspecto separado, peinado y ordenado, a modo de láminas superpuestas.

menos presión. También se puede añadir a estos argumentos la fuerza centrífuga del fluido por el efecto de giro que impone la curvatura del perfil, esto hace que aparezca más depresión en el extradós que en el intradós. Todo ello es manifestación de lo mismo, un flujo que genera una distribución de presión sobre él. La generación de sustentación puede verse desde una perspectiva global, quizás más entendible. El borde de salida impone una dirección a la corriente tras el perfil que supone una deflexión a la corriente incidente, es decir, un cambio de dirección. Esta deflexión supone una adición de flujo de cantidad de movimiento perpendicular a la corriente, la cual exige, por reacción, la aparición de la sustentación sobre el perfil (Del orden de  $2/3$  de la sustentación se genera por el extradós (succión) y el resto por el intradós (sobrepresión)). Esta deflexión de la corriente es local, es decir, se circunscribe a las inmediaciones del perfil. La dirección del flujo a la salida tiende a la dirección de la corriente sin perturbar al alejarse del perfil.

Si el ángulo de ataque del perfil  $\alpha$  es excesivo, digamos que superior a unos  $15^\circ$  a  $20^\circ$  con respecto a la línea de sustentación nula, la corriente del extradós no puede seguir los fuertes cambios de dirección que esto supone y se desprende de la superficie del perfil, dejando de ejercer succión, siendo ocupado su lugar por un fluido que proviene de las inmediaciones, el cual también se desprende. Este movimiento adquiere carácter turbulento tridimensional, altera la distribución de presiones y estropea el funcionamiento del perfil. Como consecuencia se pierde sustentación y aumenta la resistencia. Se dice entonces que el perfil está en pérdida (stall en inglés).

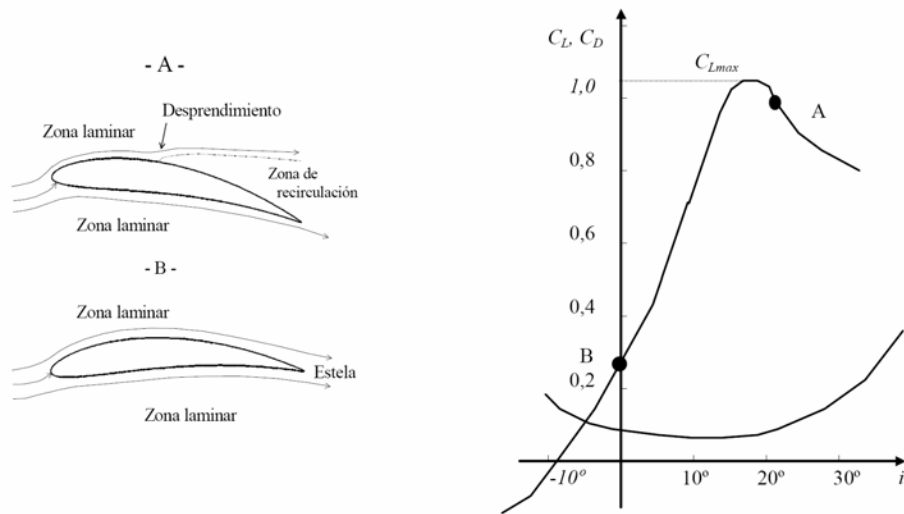


Figura 38. Esquema de la corriente adherida al perfil y desprendida por excesivo ángulo de ataque y los correspondientes puntos en las curvas de coeficientes de sustentación y resistencia.  
Fuente: Arias Vega, 2006

La resistencia aerodinámica del perfil se debe a dos causas, una es la distribución de presiones que da una componente según la corriente y la otra son los esfuerzos de cortadura en la capa límite originados por el elevado gradiente de velocidades en ella, que hacen que las velocidades de la corriente se anulen al llegar a la pared.

De todo lo anterior puede deducirse que las presiones actuando sobre la superficie han de ser proporcionales a la presión dinámica de la corriente sin perturbar  $\frac{1}{2}\rho v^2$  y en consecuencia la sustentación  $L$ , resistencia  $D$  y par de encabritamiento  $\mathcal{M}$ . Éstas han de ser proporcionales asimismo al área de la pala  $S$ , área sobre la que se aplican las diferencias de presión; que para una forma en planta rectangular es igual al producto de la cuerda  $c$  por la envergadura  $l$ ,  $S=cl$ . Los efectos viscosos intervienen, por lo que la influencia del número de Reynolds,  $Re$ , será apreciable. Será asimismo apreciable el efecto del número de Mach  $M$  cuando su valor sea del orden de la unidad. En consecuencia, podemos definir unos coeficientes adimensionales de sustentación, resistencia y de momento con una dependencia funcional tal y como la siguiente:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} = C_L(\alpha, Re, Mach, t_{max}/c, c_{max}/c) \quad (50)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} = C_D(\alpha, Re, Mach, t_{max}/c, c_{max}/c) \quad (51)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} = C_M(\alpha, Re, Mach, t_{max}/c, c_{max}/c) \quad (52)$$

Se define eficiencia aerodinámica al resultado del cociente  $C_L/C_D$  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. Para ayudar a evaluar las actuaciones de los perfiles se suele representar este parámetro o su inverso como función de  $C_L$ , determinando la recta tangente desde el origen, su valor máximo posible.

Se examina a continuación la dependencia de los parámetros:

- **Ángulo de ataque ( $\alpha$ ):** Es la variable operacional más importante. La Figura 33., muestra los resultados del ensayo de un perfil. Puede observarse que el coeficiente de sustentación  $C_L$  crece aproximadamente de forma lineal con el ángulo de ataque hasta la llegada del desprendimiento, a unos  $16^\circ$  en que alcanza un máximo superior a la unidad y cae bruscamente debido a la entrada en pérdida. La teoría demuestra que la pendiente de esta curva debería ser idealmente  $\pi$  (con el ángulo en radianes), para cualquier perfil, pero es ligeramente menor por efecto de la capa límite. El coeficiente de resistencia tiene un comportamiento aproximadamente parabólico con un mínimo para ángulo de ataque pequeño, del orden de 0.08, disipándose su valor en las proximidades de la pérdida. El coeficiente de momento es sensiblemente constante. La eficiencia máxima se alcanza con  $C_L \approx 0.8$  con  $\alpha \approx 4^\circ$ .
- **Número de Reynolds (Re):** Al crecer la menor importancia de las fuerzas viscosas hacen que mejore el comportamiento del perfil, aumentado  $C_L/C_D$ ,  $C_{Lmax}$  y  $C_{Dmin}$ . A números de Reynolds elevados, la mejora se comporta asintóticamente. El número de Reynolds de los perfiles en las palas de aeroturbinas es relativamente bajo, por lo que ha de tenerse en cuenta su influencia.

- **Numero de Mach (M):** Su valor no muy alto hace que salvo en las palas muy rápidas y vientos elevados no sea necesario tener en cuenta su efecto sobre el comportamiento del perfil, pudiéndose optativamente introducir correcciones.

**Parámetros Geométricos:** Usando una distribución de espesor y de curvatura, se reduce la elección al espesor máximo  $t_{\max}/c$  y a la curvatura máxima  $c_{\max}/c$ , expresados ordinariamente en % de la cuerda. Los perfiles con espesor bajo muestran buenas características en un rango pequeño de ángulos de ataque, pero dan lugar a una pala estructuralmente débil. Un espesor grande robustece la pala y proporciona una entrada en pérdida gradual, pero origina un mayor coeficiente de resistencia  $C_D$ . Normalmente se eligen los espesores mínimos compatibles con los requerimientos estructurales, por lo que las palas tienen habitualmente perfiles de pequeño espesor relativo en la punta y éste crece hacia la raíz. Los perfiles con curvatura mayor muestran su mayor rendimiento con coeficientes de sustentación mayores y correspondientemente ángulos de ataque mayores, eligiéndose por lo tanto en función del coeficiente de diseño deseado.

Con métodos de producción de bajo coste no suele ser posible reproducir muy exactamente las formas requeridas por los perfiles, por lo que ocurre una pérdida de eficiencia. Existen perfiles más tolerantes a ello que otros, lo mismo que es distinta la tolerancia a suciedades incrustadas, o gotas de lluvia depositadas en la superficie, erosión, pequeñas grietas y formación de hielo. La zona más sensible a éstas imperfecciones en la forma es el primer tercio del extradós, donde la capa límite es más delgada.

Los perfiles que proporciona una placa simplemente curvada y de espesor constante, usada en las aerobombas de baja velocidad dan lugar a eficiencias bajas, como ocurre con los perfiles resultado de usar velas.



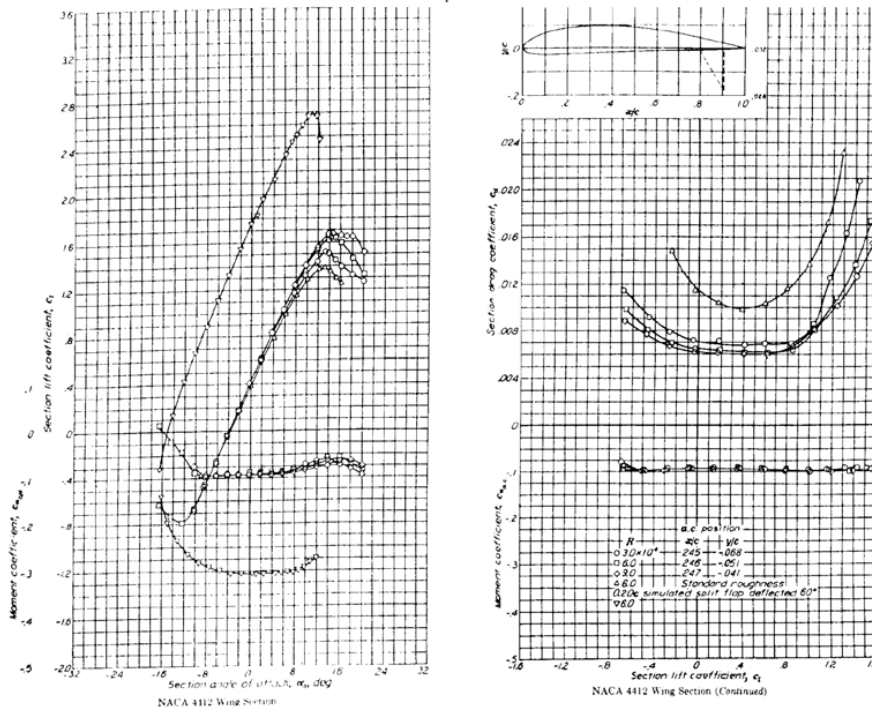


Figura 39. Curvas polares de un perfil  
Fuente: Arias Vega, 2006

Debido a que la pala no se extiende hasta el infinito, el fluido cerca de la punta intenta bordearla para igualar la sobrepresión en el intradós a la succión en el extradós. Este movimiento transversal a los perfiles ocasiona un torbellino libre que arranca en el borde de la pala y que es arrastrado por la corriente. Este flujo hace también que el coeficiente de sustentación del perfil del extremo de la pala sea nulo, independientemente de su geometría. El teorema de Kutta-Joukowski asocia la sustentación que proporciona cualquier cuerpo 2D ante una corriente ideal incompresible y uniforme con circulación  $\Gamma$  del vector velocidad alrededor de una curva de contorno cerrado que englobe el perfil. Por otro lado, se demuestra que la circulación alrededor de un contorno cerrado arbitrario conteniendo nada más que fluido, es nula si el flujo es ideal (sin viscosidad ni conductibilidad) e incompresible, diciéndose entonces que el flujo es irrotacional. El flujo alrededor de un perfil aerodinámico a elevados números de Reynolds se aproxima al irrotacional salvo en la capa límite. Luego, la sustentación de un perfil se ha de deber a la circulación embebida en la capa límite (donde los efectos viscosos dominan) o en el interior del propio perfil. Esta circulación se asocia a un torbellino ligado al perfil sin distinguir si está asociado a la capa

límite o al sólido. Si consideramos la pala, el torbellino en forma de hilo resultante de los sucesivos perfiles a lo largo de  $r$ , asociado a ella no puede acabar en el fluido, dada la irrotacionalidad del flujo. Por lo tanto, se desprende por sus extremos inyectando rotacionalidad concentrada en el fluido. Estos torbellinos desprendidos en raíz y punta no ocasionan sustentación, pues son arrastrados por la corriente y por lo tanto no hay velocidad transversal de la corriente con respecto a ellos. Ambos torbellinos desprendidos se unen en el infinito, formando un circuito cerrado, dada la imposibilidad de acabar en el fluido<sup>15</sup>.

Estos torbellinos pueden desprenderse paulatinamente a lo largo de la longitud de la pala si la sustentación a lo largo de ella varía. Estos torbellinos tienen tendencia a arrollarse sobre sí mismos formando uno más intenso y localizable en la punta de la pala, o en la raíz de la misma.

Estos torbellinos justifican la anulación de la sustentación en el final de una pala, o de un ala y resultan coherentes con el bordeado que realiza el fluido para tratar de igualar las presiones en intradós y extradós, como se vio anteriormente.

El flujo alrededor de las palas puede pues concebirse exclusivamente como la superposición de una corriente uniforme y de un sistema de torbellinos. Ha de cumplir una serie de condiciones:

- Que recorran internamente la pala.
- Que se desprendan de ella para describir la distribución de sustentación a lo largo de su longitud.
- Que desde el punto de desprendimiento hasta el infinito aguas abajo posean la velocidad del fluido.

---

<sup>15</sup>En un fluido viscoso los torbellinos van decayendo al alejarse de la aeroturbina, desapareciendo a una cierta distancia de él, degradados en energía térmica. No obstante, antes de que esto ocurra, las inestabilidades del sistema de torbellinos hace que se arracimen y pierdan la axilsimetría.

A su vez, la velocidad del fluido en cada punto del flujo resulta de la inducción de todos los torbellinos salvo el elemento del que pase eventualmente por el punto considerado (Ley de Biot-Savart).

Este modelo no considera la viscosidad, pero es coherente con ella. Los efectos de la viscosidad no tenidos en cuenta hacen que los torbellinos vayan perdiendo intensidad, por degradación de la energía mecánica en térmica, desapareciendo a una cierta distancia aguas debajo de la turbina. Además, aparecen inestabilidades en el sistema de torbellinos concebido anteriormente, que hacen que se pierda simetría axial.

La teoría turbillonaria de la sustentación provee resultados satisfactorios cuando se realiza un modelo de aeroturbina basado en ella, con un coste computacional bajo, por lo que es ampliamente usada. Adicionalmente, provee de conclusiones teóricas muy útiles.

### **d.3.6. Diseño de Perfiles Aerodinámicos**

#### **d.3.6.1. Métodos de diseño de perfiles aerodinámicos**

Jepson[20] expresa que los métodos de diseño de perfiles se pueden clasificar ampliamente en dos tipos: diseño directo e inverso. El proceso del diseño del perfil viene de un conocimiento de las propiedades de la capa límite y de la relación entre la geometría y la distribución de presiones.

Una aproximación para el diseño de perfiles es usar un perfil que ya fue diseñado por alguien. Este método es llamado “optimización de perfiles” y trabaja bien cuando los objetivos de un problema de diseño particular suelen coincidir con los objetivos del diseño de perfil original. En estos casos, los perfiles deben ser elegidos de catálogos tales como son: “Teoría de secciones de ala” de Abbott y Von Doenhoff[21], “Profilkatalog Stuttgarter” de Althaus y Wortmann, “Catálogo de perfiles para bajo número de Reynolds” de Althaus o de “Perfiles a bajas velocidades” de Selig. La ventaja a esta aproximación es que hay disponibilidad de los datos de las pruebas. Sin embargo, las herramientas disponibles ahora son lo suficientemente refinadas que se puede asegurar que el rendimiento predicho se puede obtener.

- **Diseño Directo**

Filippone[13] señala que los métodos directos para el diseño de perfiles incluyen la especificación de la geometría de la sección, el cálculo de presiones y rendimiento. Se evalúa la forma dada y entonces se modifica la forma para mejorar el rendimiento mediante la optimización. Los rendimientos aerodinámicos pueden ser controlados directamente usando métodos de optimización, generalmente basada en la evaluación de algunos gradientes. La optimización apunta a la minimización de una función objetivo característica de los rendimientos del perfil. Anderson[10] describe el diseño directo, donde la forma del perfil es dada y la distribución de presiones de la superficie se calcula, mediante la teoría de perfil delgado y los métodos de panel numéricos.

Csanady[22] define el diseño directo como sigue, dada una forma de los álabes en una cascada, se debe encontrar la distribución de presiones para una tasa de flujo específica y la dirección de flujo a la entrada. Jepson describe que en el método directo, la forma del perfil se usa como punto inicial para el ciclo de diseño. Los resultados aerodinámicos se calculan como una salida del diseño. Sucesivamente ajustando la forma, la aproximación del diseño trabaja hacia la obtención de un perfil que resulta en el rendimiento deseado. La figura 40 presenta una representación esquemática del proceso de diseño directo, en el cual la forma del perfil es usada para calcular las distribuciones de velocidad, características de capa límite, la posición de la transición laminar a turbulenta y finalmente la polar de arrastre.

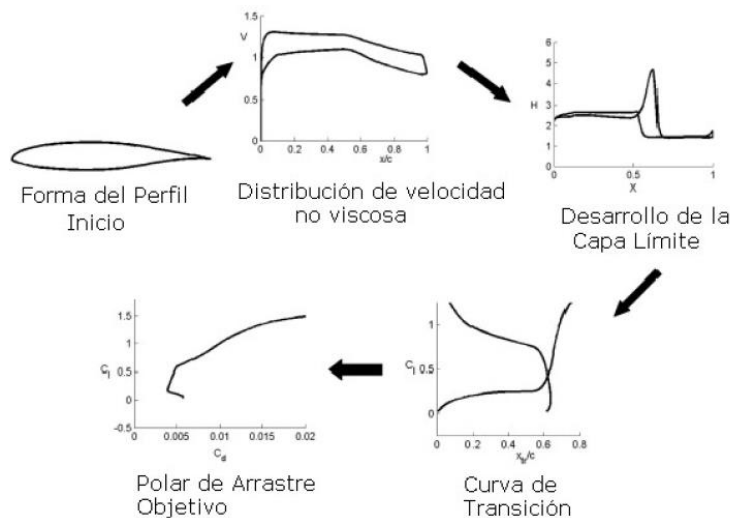


Figura 40. Diagrama de flujo del diseño directo

- **Diseño Inverso**

Filippone[13] define el diseño inverso como la determinación de la forma del perfil correspondiente a una distribución de presiones de superficie especificada bajo condiciones de flujo. Anderson [10] describe que es deseable especificar la distribución de presiones de superficie, una presión que logre el rendimiento del perfil mejorado, y calcular la forma de perfil que producirá la distribución de presiones especificada, esta aproximación es llamada diseño inverso.

Csanady [22] define el diseño inverso como sigue, a ciertas condiciones pre-escritas de flujo, para una distribución de presiones pre-escrita a lo largo de la superficie del álabe (especificada, por ejemplo, de tal manera de evitar la separación de la capa límite, cavitación local, o velocidades aproximadas a la velocidad sónica) se debe encontrar la forma del álabe. Jepson describe que el objetivo de un método de diseño de perfiles inverso es determinar la forma de un perfil que satisfaga especificaciones geométricas y aerodinámicas. Los primeros métodos permitían la prescripción de la distribución de velocidad no viscosa a un solo ángulo de ataque. La motivación de estos métodos fue tomar ventaja de las relaciones entre la distribución de velocidad y otras propiedades aerodinámicas tales como sustentación, arrastre y momento de cabeceo. Estas relaciones resultan del hecho que la velocidad es una medición de la presión de superficie. Los gradientes de velocidad sobre el perfil también se determinan del desarrollo de la capa límite. Del desarrollo de capa límite también se puede calcular la resistencia al avance. Por lo tanto, el rendimiento total del perfil puede ser indirectamente controlado especificando la distribución de velocidad. Subsecuentemente, para permitir un mayor control sobre el rendimiento final del perfil, los métodos de diseño de perfil inversos fueron desarrollados y permitieron especificaciones en el desarrollo de capa límite. En estos métodos primero se usa un método de capa límite inverso para determinar la distribución de velocidad, después esta distribución de velocidades es usada para determinar la forma del perfil. Zingg[14] señala una descripción, la aplicación y las desventajas del método inverso. Dahl [15] da una descripción del método. Liebeck [16] describe el método inverso al igual que las referencias anteriores. La figura 41 muestra la representación esquemática del diseño inverso.

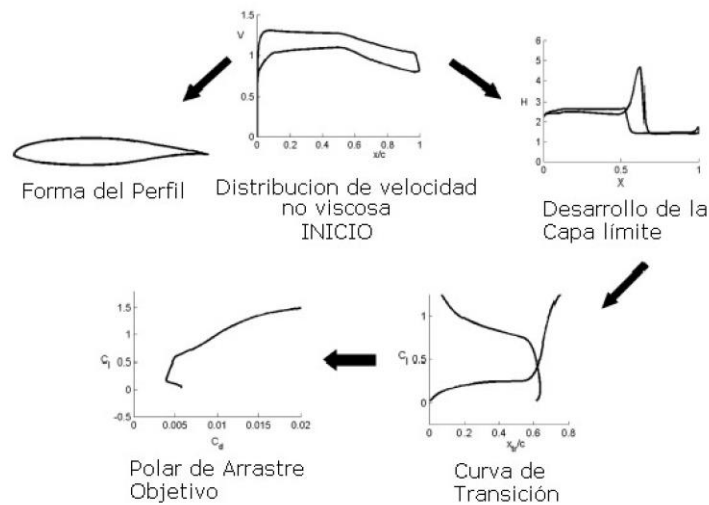


Figura 41. Diagrama de flujo del diseño inverso

En general, el diseñador especifica una función objetivo que comúnmente es la distribución de presión. Es a veces posible especificar una distribución  $C_p$  deseada y usar la diferencia de mínimos cuadrados entre los verdaderos  $C_p$ 's y los designados como el objetivo. Esto es la idea básica detrás de una variedad de métodos para el diseño inverso. El diseño inverso requiere que el diseñador especifique una distribución de presiones que producirá el rendimiento deseado, la forma que produce esta distribución de presiones se calcula usando un método inverso. La segunda parte del problema de diseño empieza cuando uno ha definido de algún modo un objetivo para el diseño del perfil. Esta etapa del diseño involucra cambiar la forma del perfil para mejorar el rendimiento. Esto puede ser hecho en dos formas:

1. Usando conocimientos de los efectos de los cambios de geometría sobre el  $C_p$  y los cambios del  $C_p$  sobre el rendimiento.
2. Por la optimización numérica, usando funciones de forma para representar la geometría del perfil y dejando que la computadora, mediante un algoritmo previamente programado, realice la secuencia de modificaciones que se necesitan para la mejora del diseño.

### **d.3.6.2. Tipos de diseño de perfiles aerodinámicos**

El objetivo de un diseño de perfil es variado. Algunos perfiles son diseñados para producir bajo arrastre (y pueden no ser diseñados para generar sustentación del todo). Algunos perfiles pueden necesitar producir un bajo arrastre mientras producen una cantidad dada de sustentación. En algunos casos, el arrastre realmente no importa, sino el máximo levantamiento es lo que realmente importa. El perfil debe ser diseñado para lograr este rendimiento con una limitación: en el espesor, o en el momento de cabeceo, o en el rendimiento fuera del diseño, o en algunas otras limitaciones inusuales. Sin considerar los objetivos de diseño y las restricciones, uno se enfrenta con algunos problemas muy comunes que hacen difícil el diseño de perfiles.

- **Diseño de perfiles con espesor máximo**

La dificultad con los perfiles con espesor es que la presión mínima es reducida debido al espesor. Esto resulta en un gradiente de presión adversa más severa y la necesidad de iniciar la recuperación prontamente. Si el punto de máximo espesor se especifica, la sección con el espesor máximo debe recuperarse de un punto en particular con el gradiente más inclinado posible. La sección más gruesa posible tiene una capa límite justo sobre el borde de separación durante toda la recuperación. Somers diseña y analiza una familia de perfiles gruesos, los S822 y los S823, para turbinas de viento de eje horizontal de 3 a 10 metros con pérdida regulada, los objetivos principales son obtener la máxima sustentación y un bajo arrastre, todo bajo las restricciones de momento de cabeceo y espesor del perfil.

- **Diseño de perfiles con sustentación máxima**

Para producir coeficientes de sustentación elevados, se requieren presiones demasiado negativas sobre la superficie superior del perfil. El límite para esta succión puede ser relacionado con los efectos de compresibilidad, o puede ser impuesto por el requisito de que la capa límite sea capaz de retrasarse en su gradiente de presión adversa. Selig y Guglielmo [17] presentan una nueva filosofía de diseño de perfiles con sustentación máxima validada experimentalmente en pruebas de túnel de viento. La clave de esta filosofía es usar una presión de recuperación cóncava con carga trasera. Se utilizaron tres códigos de diseño

y análisis (PROFOIL, el código Eppler e ISES) para diseñar el perfil de sustentación máxima S1223 para un número de Reynolds de  $2 \times 10^5$ .

- **Diseño de perfiles Laminares**

El flujo laminar puede ser útil para reducir el arrastre por fricción, incrementando la máxima sustentación y reduciendo la transferencia de calor. Se puede lograr fácilmente a bajos números de Reynolds manteniendo una superficie delgada y usando un perfil con un gradiente de presión favorable.

Bradford E. Green et al. [18] Desarrollan un método de diseño iterativo en el cual un perfil se puede diseñar con una cantidad substancial de flujo laminar, mientras se mantienen otras restricciones geométricas y aerodinámicas. Las reducciones de arrastre se realizan usando el método de diseño sobre un rango de números de Mach, números de Reynolds y espesores de perfil. Jepson [20] desarrolla una aproximación para la cual una curva deseada de transición de capa límite puede ser especificada como una entrada en el diseño inverso, también presenta una aproximación para incorporar consideraciones de diseño de la aeronave en el proceso de diseño inverso. Somers [12] diseña y analiza teóricamente una familia de perfiles de flujo laminar natural (NFL) para ventiladores de torres de enfriamiento. Los objetivos de una elevada sustentación y un bajo arrastre fueron alcanzados. Somers [12] diseña y analiza teóricamente el perfil S829 de flujo laminar natural (NFL) de 16% espesor para la región de punta de una turbina de viento de eje horizontal de 20 a 40 metros de diámetro con pérdida regulada. Los objetivos principales son la máxima sustentación y bajo arrastre, bajo las restricciones de momento de cabeceo y el espesor del perfil, además de que el perfil debe tener una pérdida dócil.

- **Diseño de perfiles Transónicos**

Filippone [13] señala que a velocidades más altas se tienen los perfiles en el rango transónico, aquí se desea diseñar perfiles súper-críticos y la optimización de los perfiles básicos para mover la onda de choque dondequiera que ocurra (minimización de la resistencia al avance). Se desea limitar las pérdidas por resistencia aerodinámica de la onda de choque a una velocidad transónica. El problema de diseño transónico es crear una



sección de perfil con elevado levantamiento y/o espesor sin causar fuertes ondas de choque. Una regla general es que los números de Mach locales máximos no deben exceder aproximadamente de 1.2 a 1.3 sobre un perfil súper-crítico bien diseñado.

Filippone [13] indica que este tipo de diseño ha sido tratado por Volpe y Melnik. Volpe y Melnik [23] señalan que la solución exacta de Lighthill del problema de determinar la forma del perfil que corresponde a una distribución pre-escrita en un flujo incompresible demuestra que la distribución de presiones de superficie y la velocidad de corriente libre no pueden ser pre-escritas independientemente, ellos presentan un nuevo método que no viola la restricción antes señalada para resolver el problema inverso a velocidades transónicas. Volpe y Melnik [23] fueron entre los primeros en probar que el diseño inverso transónico estaba mal propuesto y lo dirigieron hacia el papel de las restricciones.

- **Diseño de perfiles para bajos números de Reynolds**

Los métodos de diseño a un bajo número de Reynolds deben ser capaces de tomar en cuenta los fuertes efectos viscosos que llevan a la separación de burbujas laminares, extensos efectos de capa límite, transición a la turbulencia, histéresis en los coeficientes de fuerza, comportamiento no lineal. Filippone [13] expresa que el rango de números de Reynolds es aproximadamente 50000 a 500000 (números de Reynolds más bajos todavía no son investigados). Los números de Reynolds bajos hacen el problema del diseño de perfiles difícil porque la capa límite es mucho menos capaz de manejar un gradiente de presión adversa sin la separación. Por lo tanto, los diseños para bajo número de Reynolds no tienen gradientes de presión severas y la capacidad de sustentación máxima está restringida. Los diseños de perfiles para bajos números de Reynolds son abominables con el problema de demasiado flujo laminar. Es a veces difícil garantizar que la capa límite sea turbulenta sobre las regiones de recuperación de presión más pronunciadas. Las burbujas de separación laminar son comunes y a menos de que sean estabilizadas, pueden resultar en un excesivo arrastre y en un bajo coeficiente de sustentación. A bajos números de Reynolds, la mayoría o todas las capas límite son laminares. Bajo tales condiciones la capa límite puede manejar solamente la recuperación de presión gradual. Los métodos de diseño para velocidades intermedias (Números de Reynolds entre 500000 y algunos millones)

tienen las mismas características de los métodos que trabajan con rangos de velocidades bajas, la separación de burbujas laminar se puede omitir, el flujo puede ser completamente turbulento (dependiendo de la turbulencia de la corriente libre, condiciones de superficie, etc.). Wayman [19] demuestra la creación de una familia de perfiles con un bajo número de Reynolds, se crearon seis perfiles y el análisis indica un buen rendimiento de las secciones a  $Re=500000$ .

- **Diseño de perfiles multipuntual**

El diseño de perfiles multipuntuales incluye efectos no lineales de un elemento sobre los otros elementos. Una de las dificultades en el diseño de un buen perfil es el requisito para el rendimiento aceptable fuera de diseño. Mientras que un perfil con un bajo arrastre no es demasiado difícil de diseñar, podría separarse en ángulos de ataque ligeramente altos de su punto de diseño. Los perfiles con la capacidad de una elevada sustentación pueden funcionar muy poco a bajos ángulos de ataque. Se puede acercar el diseño de perfiles con puntos de diseño múltiples en una manera bien definida. A menudo está claro que la superficie superior será crítica en uno de los puntos y podemos diseñar la superficie superior en esta condición. El intradós puede ser diseñado para hacer que la sección actúe apropiadamente en el segundo punto. Las restricciones están afectadas por la geometría de borde de salida del perfil. Cuando tal compromiso no es posible, la configuración de geometría variable puede ser empleada (algo costosa) como en los sistemas de hipersustentación. En este tipo de diseño Selig [17] resuelve el problema usando un método de Newton-Raphson mediante la especificación de las distribuciones de velocidad a lo largo de los segmentos, para un ángulo de ataque dado, usando un trazado con tres restricciones integrales. Selig y Gopalarathnam presentan un método inverso multipuntual para el diseño de perfiles con múltiples elementos con una distribución de velocidad deseada en flujo potencial incompresible. El método usa un código inverso, multipuntual y de perfil aislado para generar cada elemento del perfil con múltiples elementos y un método de panel bidimensional para analizar el perfil con múltiples elementos. Mediante una iteración de Newton, las variables asociadas con el diseño de elementos aislados son ajustadas para lograr las distribuciones de velocidad multi-elementales deseadas.

## CAPÍTULO IV

### d. 4. HERRAMIENTAS DE DISEÑO, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA

#### d.4.1. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)

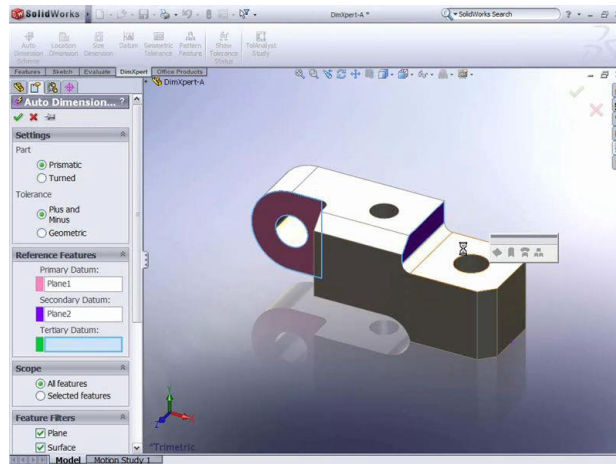


Figura 42. Ejemplo de una pieza diseñada con software CAD (SolidWorks).  
Fuente: wikipedia.org

El diseño asistido por computadora, más conocido por sus siglas inglesas *CAD* (*computer-aided design*), es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades. El CAD es también utilizado en el marco de procesos de administración del ciclo de vida de productos.

También se puede llegar a encontrar denotado con las siglas *CADD* (*computer-aided design and drafting*), que significan «dibujo y diseño asistido por computadora».

Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo en dos dimensiones (2D) y modeladores en tres dimensiones (3D). Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos.

El usuario puede asociar a cada entidad una serie de propiedades como color, usuario, capa, estilo de línea, nombre, definición geométrica, etc., que permiten manejar la información de forma lógica. Además pueden asociarse a las entidades o conjuntos de éstas otro tipo de propiedades como material, etc., que permiten enlazar el CAD a los sistemas de gestión y producción.

De los modelos pueden obtenerse planos con cotas y anotaciones para generar la documentación técnica específica de cada proyecto. Los modeladores en 3D pueden, además, producir previsualizaciones fotorrealistas del producto, aunque a menudo se prefiere exportar los modelos a programas especializados en visualización y animación.

#### d.4.2.FABRICACIÓNASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM)

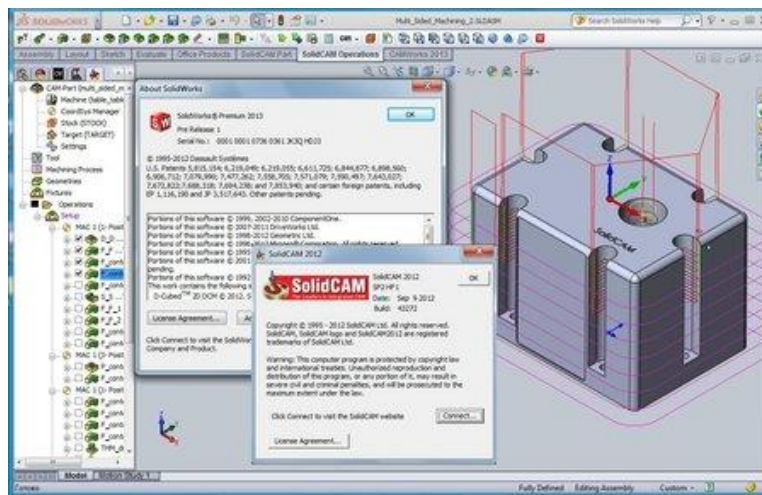


Figura 43. Ejemplo de una pieza diseñada en CAD y transportada a un sistema CAM.  
Fuente: wikipedia.org

La fabricación asistida por computadora (en Hispanoamérica) o fabricación asistida por ordenador(en España), también conocida por las siglas en inglés CAM (*computer-aided manufacturing*), implica el uso de computadores y tecnología de cómputo para ayudar en todas las fases de la manufactura de un producto, incluyendo la planificación del proceso y la producción, mecanizado, calendarización, administración y control de calidad, con una intervención del operario mínima.

Debido a sus ventajas, se suele combinar el diseño y la fabricación asistidos por computadora en los sistemas CAD/CAM. Esta combinación permite la transferencia de

información desde la etapa de diseño a la etapa de planificación para la fabricación de un producto, sin necesidad de volver a capturar manualmente los datos geométricos de la pieza. La base de datos que se desarrolla durante el CAD es procesada por el CAM, para obtener los datos y las instrucciones necesarias para operar y controlar la maquinaria de producción, el equipo de manejo de material y las pruebas e inspecciones automatizadas para establecer la calidad del producto.

Una función de CAD/CAM importante en operaciones de mecanizado es la posibilidad de describir la trayectoria de la herramienta para diversas operaciones, como por ejemplo torneado, fresado y taladrado con control numérico. Las instrucciones o programas se generan en computadora, y pueden modificar el programador para optimizar la trayectoria de las herramientas. El ingeniero o el técnico pueden entonces mostrar y comprobar visualmente si la trayectoria tiene posibles colisiones con prensas, soportes u otros objetos.

En cualquier momento es posible modificar la trayectoria de la herramienta para tener en cuenta otras formas de piezas que se vayan a mecanizar. También, los sistemas CAD/CAM son capaces de codificar y clasificar las piezas que tengan formas semejantes en grupos, mediante codificación alfanumérica.

Algunos ejemplos de CAM son: el fresado programado por control numérico, la realización de agujeros en circuitos automáticamente por un robot, y la soldadura automática de componentes SMD en una planta de montaje.

#### **d.4.3.DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

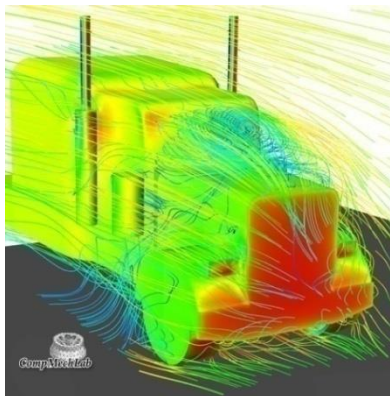


Figura 44. Objeto en un sistema CFD, simulando la interacción del aire con el mismo.  
Fuente: wikipedia.org

La dinámica de fluidos es una rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos en relación a las fuerzas que actúan sobre ellos. Pero la Dinámica de Fluidos Computacional, o CFD por sus siglas en inglés, es la utilización de las computadoras como herramientas para resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos con el fin de poder aplicarlas a problemas reales.

Así pues, hay tres niveles de estudio en la dinámica de fluidos computacional:

1. Por un lado están los aspectos fundamentales que resultan en un conjunto de ecuaciones que describen lo que físicamente ocurre en determinada situación. Puede decirse que este aspecto pertenece enteramente a la dinámica de fluidos como rama de la ciencia.
2. Después está el problema de resolver esas ecuaciones usando un ordenador. Aquí intervienen conceptos de otras disciplinas como el análisis numérico, desarrollo de software, visualización de imágenes, etc.
3. Finalmente, está el aspecto práctico, en el que el usuario generalmente usa el software creado como resultado de los dos puntos anteriores y lo aplica a problemas reales. En este caso, siempre existe la necesidad de verificar los resultados numéricos con resultados medidos cuidadosamente en un sistema de prueba. Esto se conoce como validación.

#### d.4.4.CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC)



Figura 45. Fresadora CNC realizando el mecanizado de una pieza.  
Fuente: wikipedia.org

El control numérico (CN) es un sistema de automatización de máquinas herramienta que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, en comparación con el mando manual mediante volantes o palancas.

Las primeras máquinas de control numérico se construyeron en los años 1940 y 1950, basadas en las máquinas existentes con motores modificados cuyos mandos se accionaban automáticamente siguiendo las instrucciones dadas en un sistema de tarjeta perforada. Estos servomecanismos iniciales se desarrollaron rápidamente con equipos analógicos y digitales. El abaratamiento y miniaturización de los microprocesadores ha generalizado la electrónica digital en las máquinas herramienta, lo que dio lugar a la denominación control numérico por computadora, control numérico por computador o control numérico computarizado (CNC), para diferenciarlas de las máquinas que no tenían computadora. En la actualidad se usa el término control numérico para referirse a este tipo de sistemas, con o sin computadora.

Este sistema ha revolucionado la industria debido al abaratamiento de microprocesadores y a la simplificación de la programación de las máquinas de CN.

Para mecanizar una pieza se usa un sistema de coordenadas que especificarán el movimiento de la herramienta de corte.

El sistema se basa en el control de los movimientos de la herramienta de trabajo con relación a los ejes de coordenadas de la máquina, usando un programa informático ejecutado por un ordenador.

En el caso de un torno, hace falta controlar los movimientos de la herramienta en dos ejes de coordenadas: el eje de las X para los desplazamientos laterales del carro y el eje de las Z para los desplazamientos transversales de la torre.

En el caso de las fresadoras se controlan los desplazamientos verticales, que corresponden al eje Z. Para ello se incorporan servomotores en los mecanismos de desplazamiento del carro y la torreta, en el caso de los tornos, y en la mesa en el caso de la fresadora; dependiendo de la capacidad de la máquina, esto puede no ser limitado únicamente a tres ejes.

### **Aplicaciones**

Aparte de aplicarse en las máquinas-herramienta para modelar metales, el CNC se usa en la fabricación de muchos otros productos de ebanistería, carpintería, etc. La aplicación de sistemas de CNC en las máquinas-herramienta han hecho aumentar enormemente la producción, al tiempo que ha hecho posible efectuar operaciones de conformado que era difícil de hacer con máquinas convencionales, por ejemplo la realización de superficies esféricas manteniendo un elevado grado de precisión dimensional. Finalmente, el uso de CNC incide favorablemente en los costos de producción al propiciar la baja de costes de fabricación de muchas máquinas, manteniendo o mejorando su calidad.

### **Programación en el control numérico**

Se pueden utilizar dos métodos, la programación manual y la programación automática. ..

- Programación manual



En este caso, el programa pieza se escribe únicamente por medio de razonamientos y cálculos que realiza un operario. El programa de mecanizado comprende todo el conjunto de datos que el control necesita para la mecanización de la pieza.

Al conjunto de informaciones que corresponde a una misma fase del mecanizado se le denomina bloque o secuencia, que se numeran para facilitar su búsqueda. Este conjunto de informaciones es interpretado por el intérprete de órdenes. Una secuencia o bloque de programa debe contener todas las funciones geométricas, funciones máquina y funciones tecnológicas del mecanizado. De tal modo, un bloque de programa consta de varias instrucciones.

El comienzo del control numérico ha estado caracterizado por un desarrollo anárquico de los códigos de programación. Cada constructor utilizaba el suyo particular. Posteriormente, se vio la necesidad de normalizar los códigos de programación como condición indispensable para que un mismo programa pudiera servir para diversas máquinas con tal de que fuesen del mismo tipo. Los caracteres más usados comúnmente, regidos bajo la norma DIN 66024 y 66025.

- Programación automática

En este caso, los cálculos los realiza un computador, a partir de datos suministrados por el programador dando como resultado el programa de la pieza en un lenguaje de intercambio llamado APT que posteriormente será traducido mediante un post-procesador al lenguaje máquina adecuado para cada control. Por esta razón recibe el nombre de CAM (Computer Aided Machining o Mecanizado Asistido por Computadora).

#### **d.4.4.1.Máquinas CNC**

Las máquinas con sistemas CNC, son aquellas que en lugar de operaciones manuales para su funcionamiento, requieren de un bloque de códigos que utilizan letras y números para ejecutar los movimientos necesarios para cumplir con el objetivo.

#### d.4.4.1.1. Fresadora CNC

Las máquinas CNC Fresadoras usan un cortador rotatorio para el movimiento de corte y un movimiento lineal para la alimentación. El material es empujado en el cortador, o el cortador es empujado al material, en caminos rectos o curvos tridimensionales, para producir los elementos deseados de una pieza. La pieza terminada es creada mediante la remoción de todo el material innecesario desde la pieza de trabajo. Este proceso se denomina fresado.

#### d.4.4.2Códigos CNC

Si bien existe un estándar para este lenguaje, que en realidad apunta a las máquinas industriales, los programas que generan estos códigos pueden ser muy variados, según el tipo de trabajo que se desee realizar, por ejemplo, una perforadora necesita un programa que genere códigos de perforación, una fresadora, requiere otro que genere los códigos de desgaste, una graficadora requiere un programa que genere las coordenadas de trazado del gráfico, etc.

Estos códigos son órdenes que controlan algunos parámetros en el funcionamiento de una máquina, como: sentido de giro, avance, cambio de herramienta, etc.

Tabla 5. Ejemplos de códigos CNC.

Comando	Descripción
N	Número de Secuencia
G	Funciones Preparatorias
X	Comando para el Eje X
Y	Comando para el Eje Y
Z	Comando para el Eje Z
R	Radio desde el Centro Especificado
A	Ángulo contra los Punteros del Reloj desde el Vector +X
I	Desplazamiento del Centro del Arco del Eje X
J	Desplazamiento del Centro del Arco del Eje Y
K	Desplazamiento del Centro del Arco del Eje Z
F	Tasa de Alimentación
S	Velocidad de Giro
T	Número de Herramienta
M	Funciones Misceláneas

## **e. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Materiales**

En la etapa de diseño se utilizó el siguiente software:

- SolidWorks
- Simulation (SolidWorks)
- SolidCAM
- Microsoft Office Excel
- Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Flow Simulation

Los principales materiales con los que se contó para la realización de este proyecto fueron:

- Flexómetro
- Calibrador
- Escuadra
- Calculadora
- Fresadora Universal Travis M5 con control CNC FAGOR 8055
- Bloques de madera
- Fresa tipo cigarro 8mm
- Nivel

### **Métodos**

- Deductivo: Con la información obtenida en cuanto a perfiles de NACA de la serie con 4 dígitos, se dedujo la aplicación de las expresiones matemáticas para obtenerlos puntos de la curva característica tanto de la superficie superior como inferior del perfil alar, mediante Microsoft office Excel.
- Analítico: Con los puntos obtenidos, y con las curvas en sí del perfil, se procedió a plasmar el diseño utilizando un software CAD. Seguidamente los parámetros de este diseño fueron trasladados a un software CFD que permitió simular la interacción del modelo con el aire. Seguidamente se realizó un análisis estático

y de fatiga basado en las cargas generadas por el paso del fluido a través del modelo y fuerzas de gravedad.

- Experimental: Lo siguiente fue simular la parte de mecanizado utilizando software CAM. Finalmente se trabajó en las rutinas y subrutinas del código numérico que fue ingresado en la Fresadora para el mecanizado del modelo.

## f. RESULTADOS:

En esta sección se expone desde la parte de diseño del modelo de pala para turbinas eólicas basada en un perfil alar NACA 4415 hasta la parte de su construcción.

### 1. DISEÑO DEL PERFIL (CURVAS DEL PERFIL-Microsoft Excel)

El primer paso fue encontrar los valores correspondientes a la cuerda media del perfil, para esto se eligió un valor de la relación de velocidad específica o periférica de diseño, y un coeficiente de solidez.

Se plantearon los datos de partida, esto es, el radio de la pala y el número de palas:

$$r=0.8\text{m}$$

$$N=3$$

De la **Tabla 1**. Se seleccionó un valor de relación de velocidad específica:

**TSR=4**. Ya que corresponde a un perfil alabeado.

Con el valor de **TSR**, se obtuvo, con ayuda de la **Figura 19.**, el valor del coeficiente de solidez:

$$\Omega=12.5\% \approx 0.125.$$

De esta manera de la ecuación (9), se despejó la variable  $\bar{c}$  (cuerda media), así, se obtuvo:

**Cuerda media:**

$$\bar{c} = \frac{\Omega \pi r}{N}$$

$$\bar{c} = \frac{(0.125)(\pi)(0.8\text{m})}{3}$$

$$\bar{c} = 0.104\text{m} \approx 10\text{cm}$$

Con el valor de la cuerda media ( $\bar{c}$ ), se calcularon los valores para la cuerda de punta de pala  $c_{pp}$  y la cuerda raíz  $c_{raíz}$ , mediante las ecuaciones (10) y (11):

Y como se muestra en la **Figura 20**. Se obtiene la Longitud útil de pala.

$$\text{Longitud útil de pala: } l=r-0.14r=68.8\text{cm} \approx 69\text{cm}$$

$$\text{Raíz de pala= } r-l = 80\text{cm}-69\text{cm}=11\text{cm}$$

**Cuerda punta de pala:**

$$c_{pp} = \bar{c} - 0.025l$$

$$c_{pp} = 10\text{cm} - 0.025(0.86(80\text{cm}))$$

$$c_{pp} = 8.28\text{cm} \approx 8\text{cm}$$

**Cuerda raíz:**

$$c_{raíz} = \bar{c} + 0.025l$$

$$c_{raíz} = 10\text{cm} + 0.025(0.86(80\text{cm}))$$

$$c_{raíz} = 11.72\text{cm} \approx 12\text{cm}$$

Con los valores de las cuerdas, raíz de pala y longitud útil de pala, se procedió a la obtención de los puntos de las curvas correspondientes al intradós y extradós, del perfil **NACA 4415**.

**m=4%** (curvatura máxima)

**p=40%** (posición de la curvatura máxima)

**t=15%**(espesor máximo)

Se elaboró una hoja de cálculo de **Microsoft Excel**, para determinar las coordenadas (**x,y**) del perfil alar utilizando las ecuaciones desde la(12) hasta la (21), cabe mencionar que se utilizó el valor de la cuerda raíz(**c<sub>raíz</sub>**) y el de la cuerda punta de pala (**c<sub>pp</sub>**) como cuerdas del perfil para obtener las curvas del mismo:

La primera parte comprende, la obtención del perfil, tomando como cuerda la cuerda raíz:

1. Se eligieron valores de **x** desde 0 hasta la cuerda **c** (**c<sub>raíz</sub>**).

$$0 \leq x \leq 12\text{cm}$$

Se eligió el número de puntos en las abscisas (entre más puntos, más suavidad tendrá la curva del perfil).

Se introdujo una fórmula en Excel, en función del número de puntos y el valor de la cuerda:

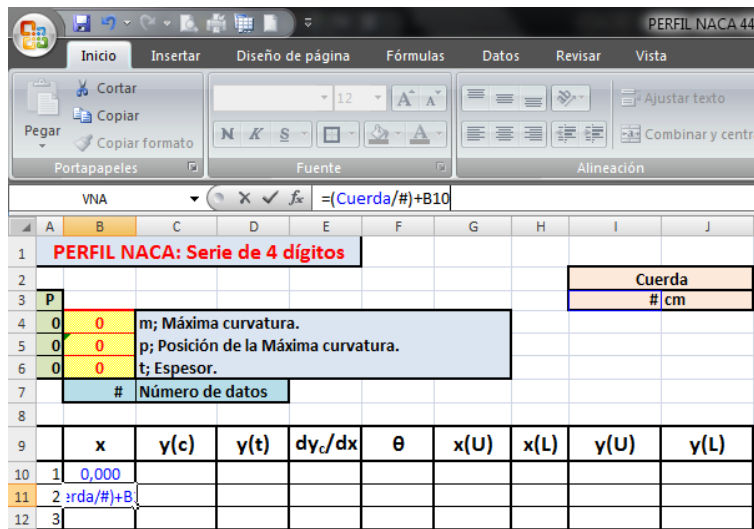


Figura 46. Hoja de cálculo. Inserción de las coordenadas x.

Se puede apreciar en la **Figura 46.**, los datos de partida, esto es, los valores correspondientes a **m, p, t**, el valor de la cuerda **c** y los datos en el eje **x**.

En la celda **B10**, el valor fue 0, puesto que las curvas del perfil parten del origen.

En la celda **B11**, se insertó la fórmula en función del número de datos o puntos que se desea obtener y del valor de la cuerda:

$$=(\text{Cuerda}/\#)+\text{B10} \quad (53)$$

Donde:

- Cuerda: Valor de la longitud de la cuerda en cm.
- #: número de coordenadas que se desea obtener

2. Se calcularon las coordenadas de la línea de curvatura media con las ecuaciones **(12)** y **(13)**. Y de igual manera se las introdujo a manera de fórmula en la hoja de cálculo de Excel (**Figura 47.**), para ello se utilizó una prueba lógica:

$$=SI(B10 < p; (((m*B10)/((p)^2))*2*(p)-(B10/Cuerda))); \quad (54)$$

$$(((m*(Cuerda-B10))/(1-p)^2)*(1-(2*p)+(B10/Cuerda))))$$

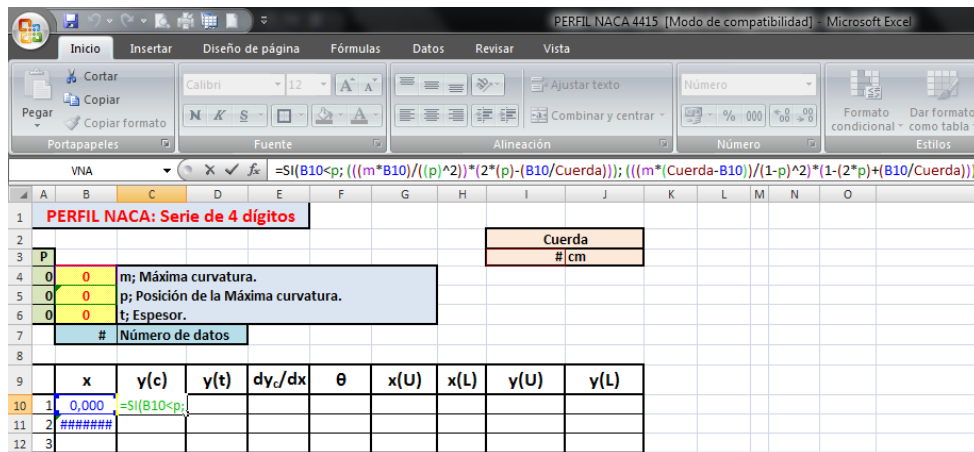


Figura 47. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas de la línea de curvatura media.

Se observa en la celda **C10 (Figura 47.)**, la prueba lógica insertada, que arroja los datos para el perfil de la curva media. Esta plantea lo siguiente:

Si **B10** es menor a **p** (es decir si las coordenadas de las abscisas, se encuentran antes de la posición de curvatura máxima), se utilizará la ecuación (12), caso contrario se utilizará la ecuación (13).

3. Se calculó la distribución de espesores por encima y por debajo de la línea media con la ecuación (14). Introduciendo ésta en la hoja de cálculo:

$$\begin{aligned}
 &= ((t * \text{Cuerda}) / 0.2) * (0.2969 * (\text{RAIZ}(\text{B10} / \text{Cuerda})) - 0.126 * (\text{B10} / \text{Cuerda}) - \\
 &0.3516 * (\text{POTENCIA}((\text{B10} / \text{Cuerda}); 2)) + 0.2843 * (\text{POTENCIA}((\text{B10} / \text{Cuerda}); 3)) \\
 &- 0.1015 * (\text{POTENCIA}((\text{B10} / \text{Cuerda}); 4)))
 \end{aligned} \tag{55}$$

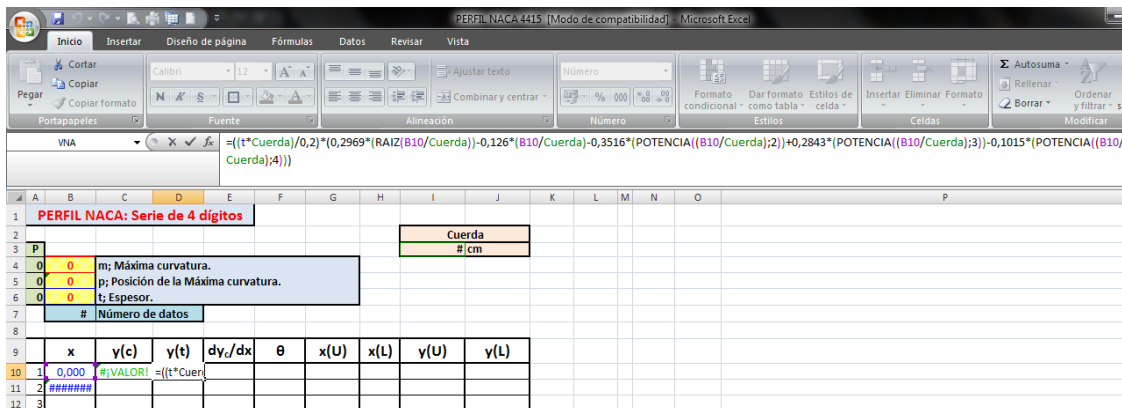


Figura 48. Hoja de cálculo. Cálculo de la distribución de espesores.

4. Se determinó el ángulo que forman las rectas tangentes a la línea de curvatura media con la línea de cuerda para cada punto. Para ello se calculó primero el valor de la



función tangente de dichos ángulos utilizando las ecuaciones(15) y(16). Se las introdujo en la hoja de cálculo (Figura 49.), utilizando una prueba lógica:

$$=SI(B10<p;(((2*m)/(POTENCIA(p;2)))*(p-B10));$$

$$(((2*m)/(POTENCIA((1-p);2)))*(p-B10)))$$
(56)

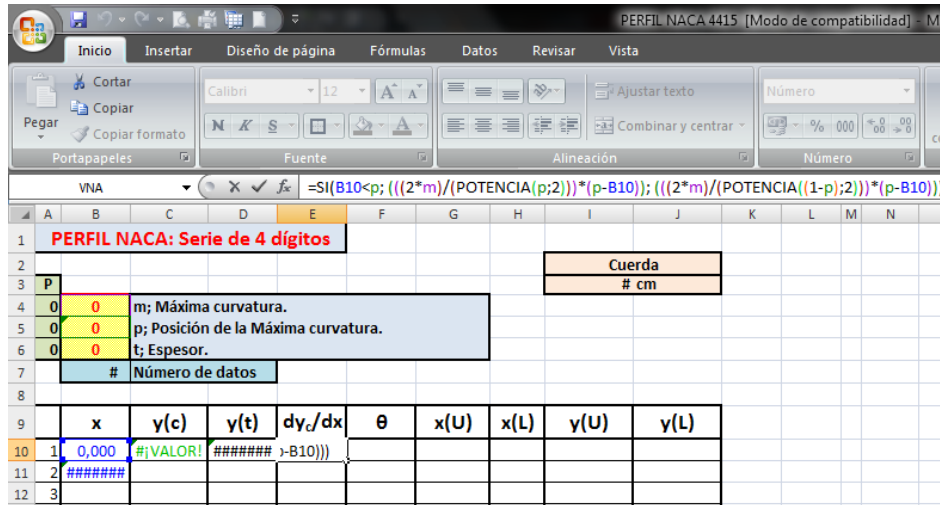


Figura 49. Hoja de cálculo. Cálculo de los valores de pendiente de las rectas tangentes sucesivas a la curva media del perfil.

Se observa, que para obtener el valor de la función tangente del ángulo formado por las rectas tangentes a la curva media del perfil, en cada valor de ( $x$ ), se debe establecer una prueba lógica, ya que las ecuaciones (16) y (17), dependen de la coordenada ( $x$ ), y de su ubicación respecto a la posición de curvatura máxima. Así, se tiene que:

Si **B10** es menor a **p** (las coordenadas de las abscisas, se encuentran antes de la posición de curvatura máxima), se utilizará la ecuación (16), caso contrario se utilizará la ecuación (17).

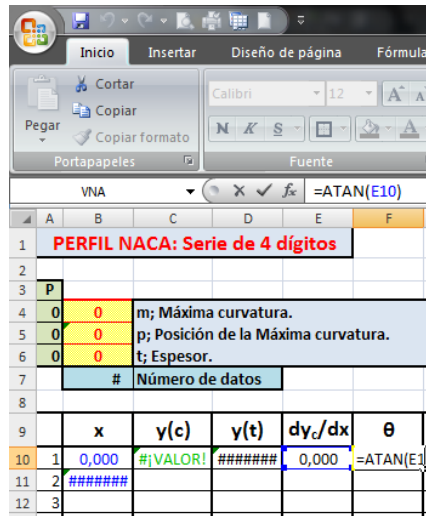


Figura 50. Hoja de cálculo. Cálculo del ángulo en función de los valores de pendiente.

Finalmente, se calculó el valor del ángulo  $\theta$ , con la función arcotangente aplicada a los valores de la columna **E** (**Figura 50.**):

$$=ATAN(E10) \quad (57)$$

5. Se determinó las coordenadas finales del perfil de la superficie superior ( $x_U$ ,  $y_U$ ) y del perfil de la superficie inferior ( $x_L$ ,  $y_L$ ) usando las ecuaciones (18), (19), (20) y (21). Las mismas que se insertaron en la hoja de cálculo de la forma siguiente:

$$=B10-(D10*SENO(F10)) \quad (58)$$

$$=B10+(D10*SENO(F10)) \quad (59)$$

$$=C10+(D10*(COS(F10))) \quad (60)$$

$$=C10-(D10*(COS(F10))) \quad (61)$$

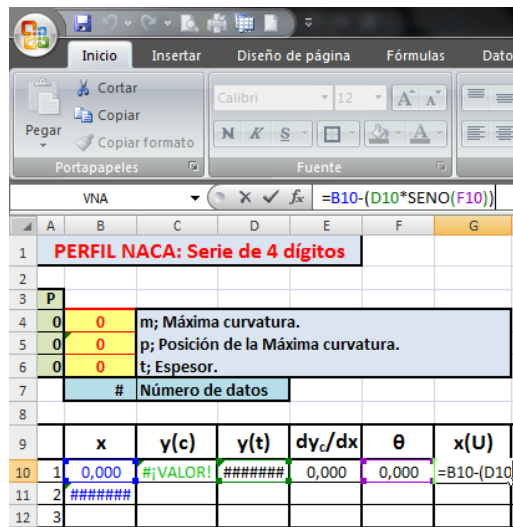


Figura 51. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas (x) para el extradós.

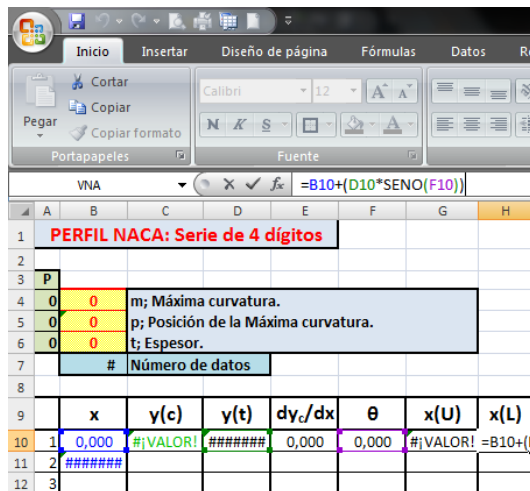


Figura 52. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas (x) para el intradós.

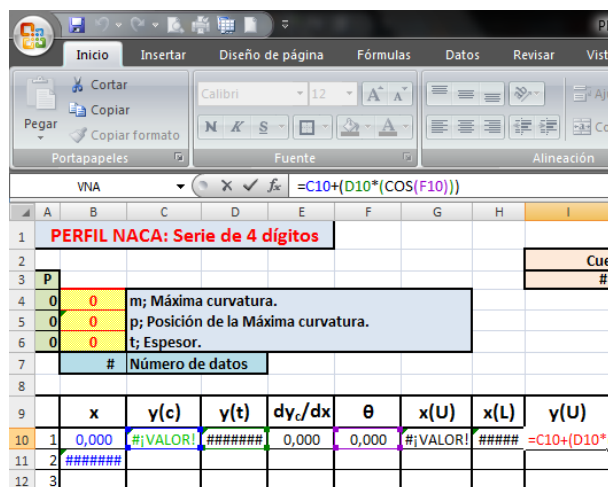


Figura 53. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas (y) del extradós.

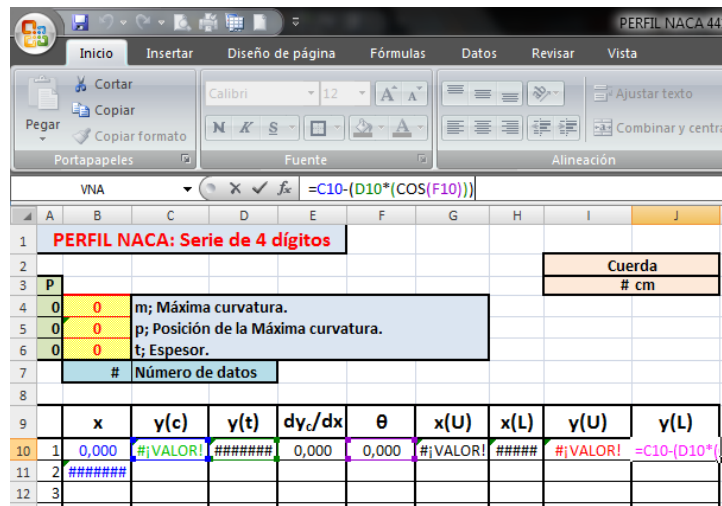


Figura 54. Hoja de cálculo. Cálculo de las coordenadas (y) del intradós.

Una vez obtenidas las coordenadas, se procedió a insertar una gráfica, para observar el perfil.

Para esto, se hace clic en **Insertar, Dispersión, Dispersión con líneas rectas y marcadores N** (Figura 55.).

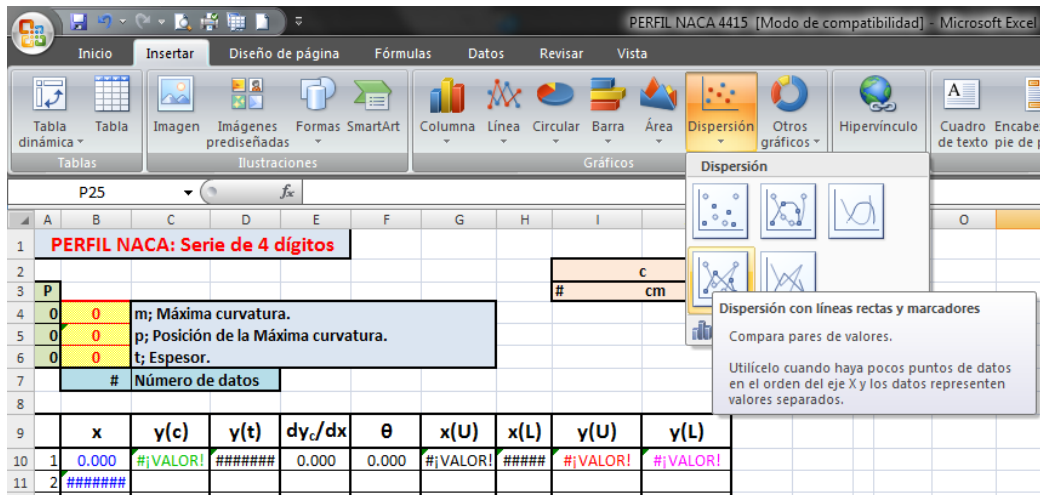


Figura 55. Hoja de cálculo. Insertar gráfica de dispersión.

Aparecerá un cuadro en blanco, se hace clic derecho sobre este y **Seleccionar datos**(Figura 56.).

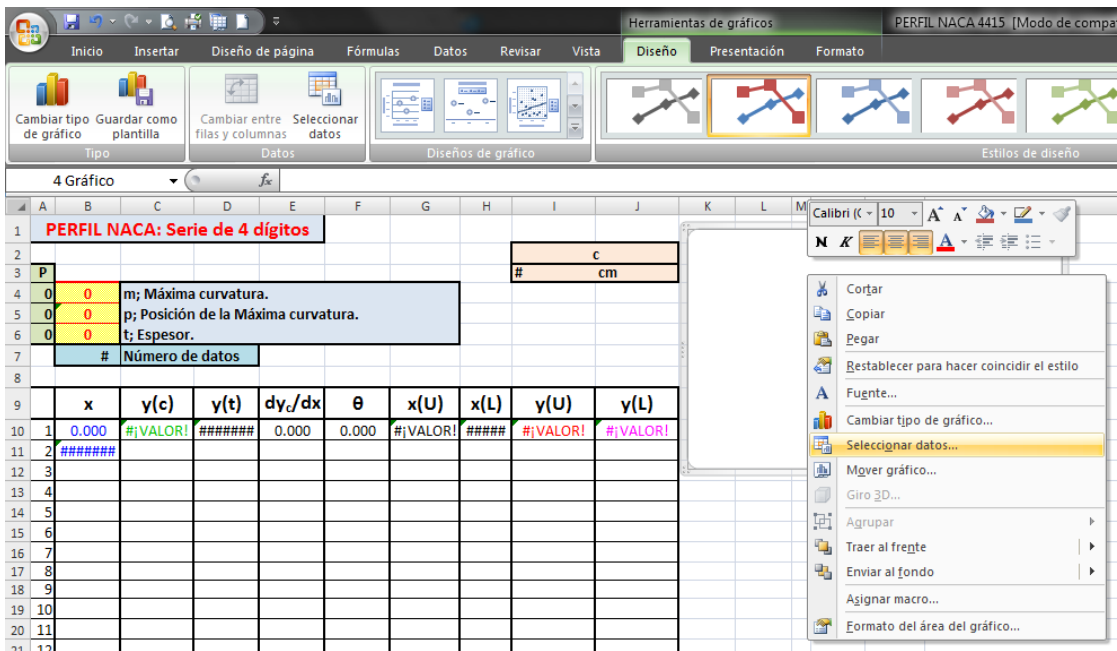


Figura 56. Hoja de cálculo. Selección de datos para la gráfica.

Aparecerá una ventana de **Seleccionar origen de datos**:

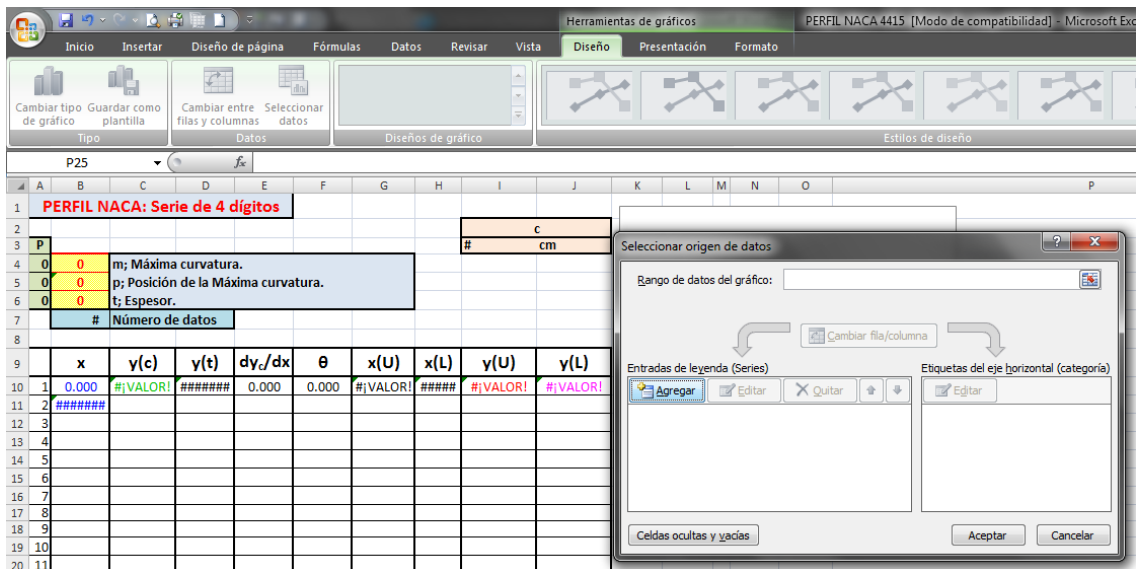


Figura 57. Hoja de cálculo. Seleccionar origen de datos para la gráfica.

Se hace clic en **Agregar** y aparecerá otra ventana de **Modificar serie**(Figura 58.).

Por motivos de exactitud, en lugar de utilizar los datos de **x(U)** (columna **G**) y **x(L)** (columna **H**), como coordenadas del eje **x**, se utilizó las de la columna **B**.

Así, para la curva del **Extradós**, se seleccionaron los valores de **x** (columna **B**) y los de **y(U)** (columna **I**). (Figura 58.).

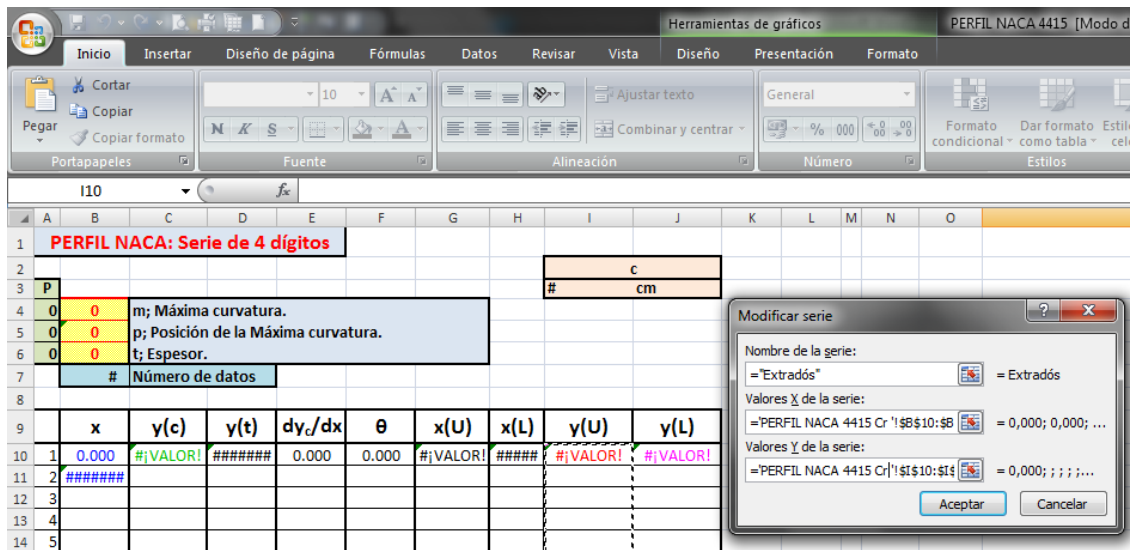


Figura 58. Hoja de cálculo. Modificar serie para la gráfica de la curva del extradós.

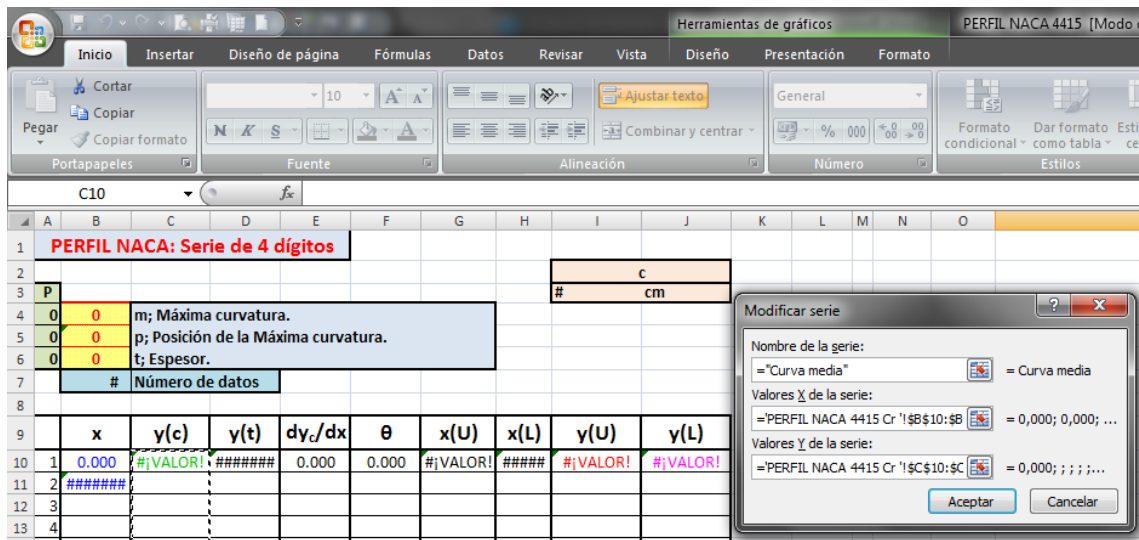


Figura 59. Hoja de cálculo. Modificar serie para la gráfica de la curva media.

De igual forma se procede para la gráfica de la curva media, los valores de **x** serán los de la columna **B** y los de **y(c)** los de la columna **C**(Figura 59.).

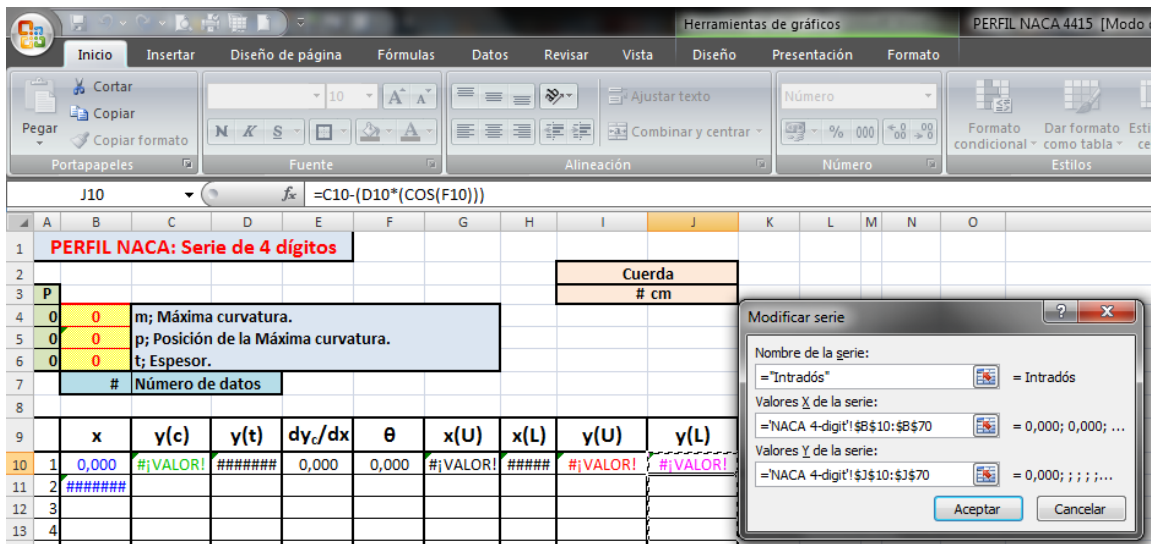


Figura 60. Hoja de cálculo. Modificar serie para la gráfica de la curva del intradós.

Finalmente se seleccionan los datos para graficar la curva del Intradós (columna B y columna J) (Figura 60.).

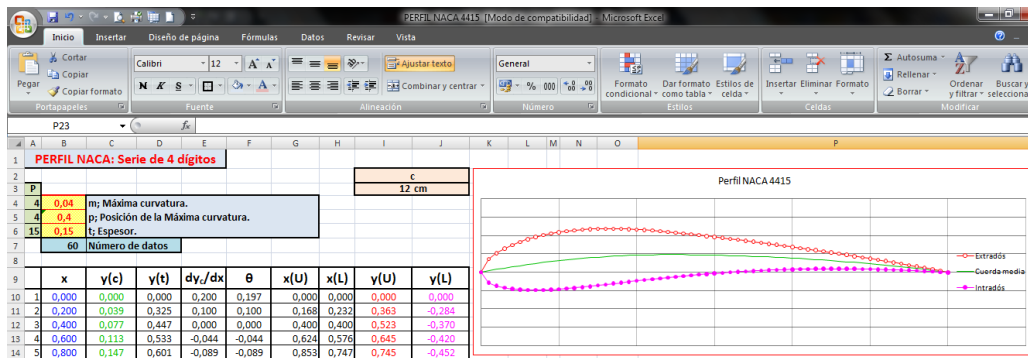


Figura 61. Hoja de cálculo. Gráficas de las curvas del perfil NACA 4415 en función de la cuerda raíz.

En la **Figura61.**, se pueden observar las tres curvas graficadas, representando en conjunto el perfil deseado, en este caso el **PERFIL NACA 4415**, a partir de un conjunto de **61** datos, ya que además de las 60 coordenadas resultantes de dividir la longitud de la cuerda en 60 partes, se debe contar el primer par de coordenadas en el origen.

La segunda parte, consta de la obtención del perfil utilizando la cuerda punta de pala ( $c_{pp}$ ) como cuerda máxima. Así se crea una nueva hoja de cálculo (**Figura 62.**):

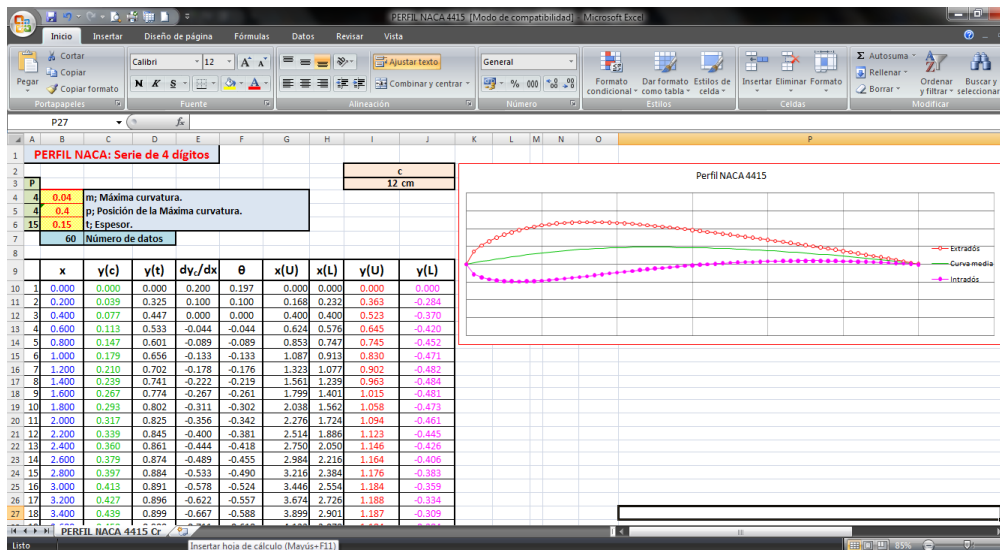


Figura 62. Inserción de nueva pestaña para la obtención de las curvas del perfil NACA 4415 en función de la cuerda punta de pala.

Los pasos para conseguir el perfil en función de la cuerda punta de pala, son los mismos que se utilizaron para conseguir el perfil en función de la cuerda raíz, al final se obtiene el **PERFIL NACA 4415**, obtenido de un conjunto de 61 datos, en función del valor de cuerda mencionada (**Figura 63.**):

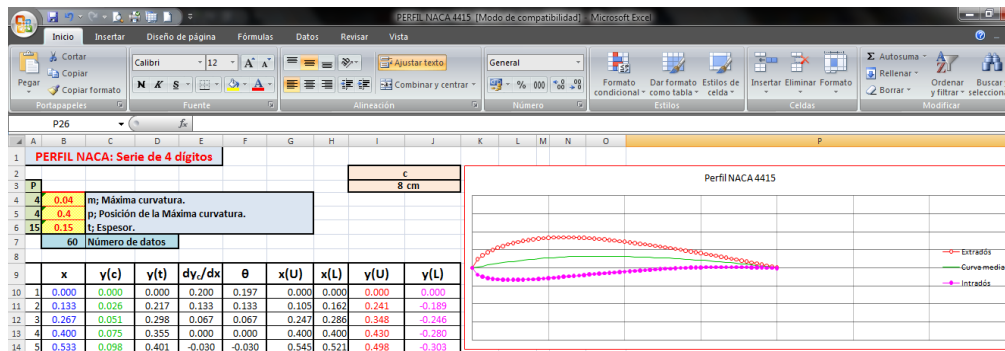


Figura 63. Hoja de cálculo. Gráficas de las curvas del perfil NACA 4415 en función de la cuerda punta de pala.

Se tendrán los perfiles alares NACA 4415 correspondientes a la cuerda raíz y cuerda punta de pala.

## 2. DISEÑO DEL MODELO DE PALA (CAD-SolidWorks)

Para diseñar el modelo de pala (utilizando las coordenadas de las curvas obtenidas mediante las hojas de cálculo de **Excel**), se utilizó el software **SolidWorks**.



1. El primer paso es insertar las curvas del perfil (la que está en función de la cuerda raíz y la que está en función de la cuerda punta de pala) a **SolidWorks**, para eso se deben trasladar las coordenadas de dichas curvas.

Dado que las unidades de las coordenadas ( $x, y$ ) están en cm, se utiliza un factor de escala de **10**, para obtener la coordenadas en mm, puesto que en el sistema **CAD**, por defecto el sistema es **MMGS (milímetro, gramo, segundo)**.

Aclarado esto se elabora una nueva hoja de cálculo, y se copian los valores de las coordenadas (**Figura 64.**):

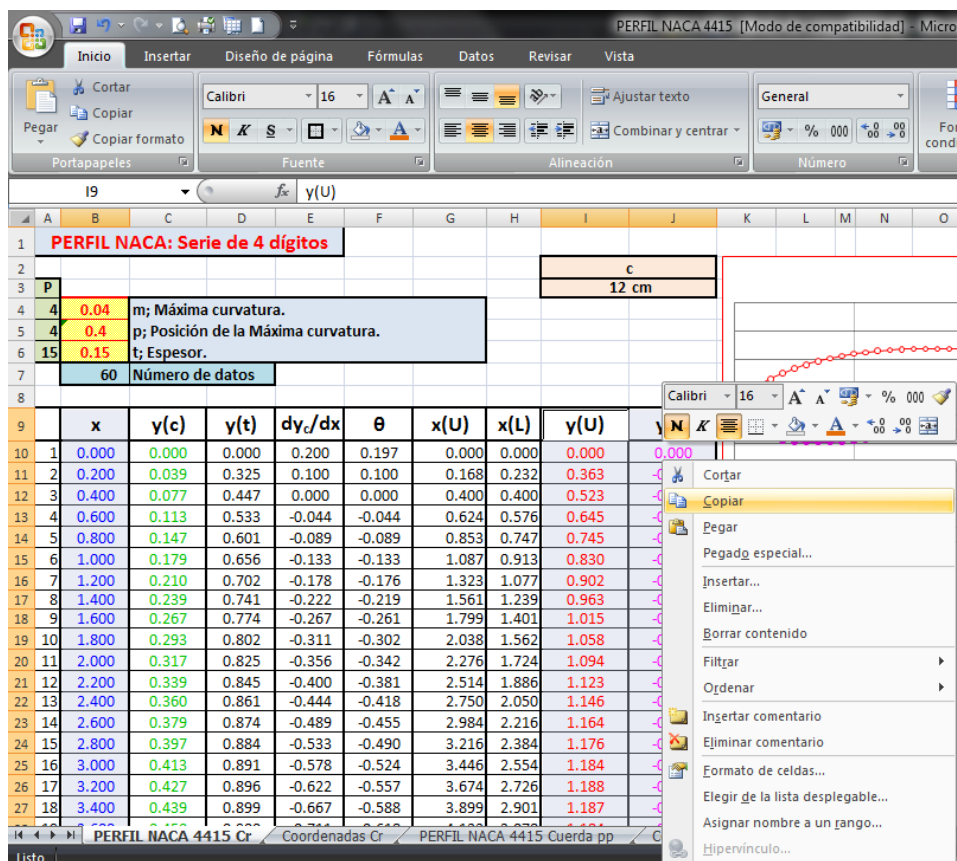


Figura 64. Obtención de los valores de coordenadas para inserción de curvas del perfil.

Y con ayuda del comando **pegado especial**, se pegan, sólo los valores de las coordenadas (**Figura 65., Figura 66.**):

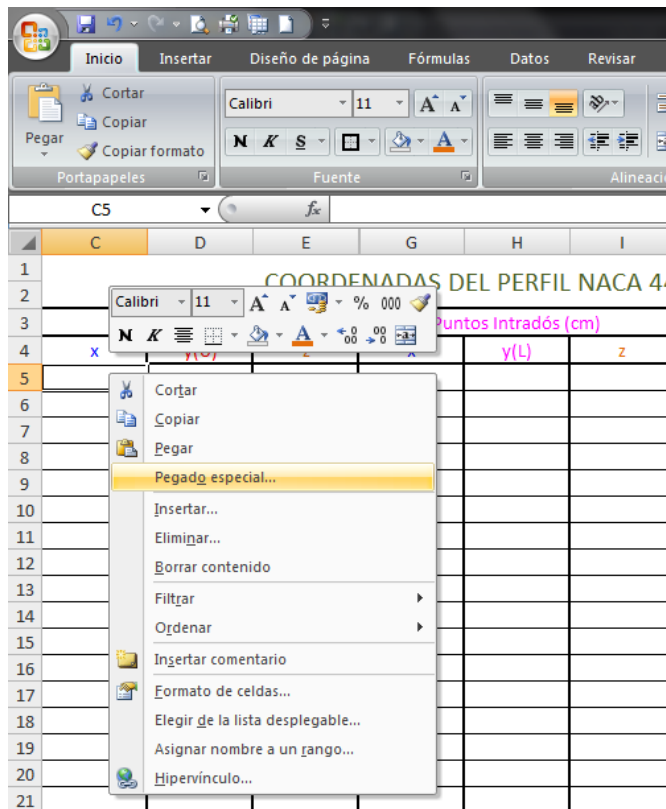


Figura 65. Opción de Pegado especial.

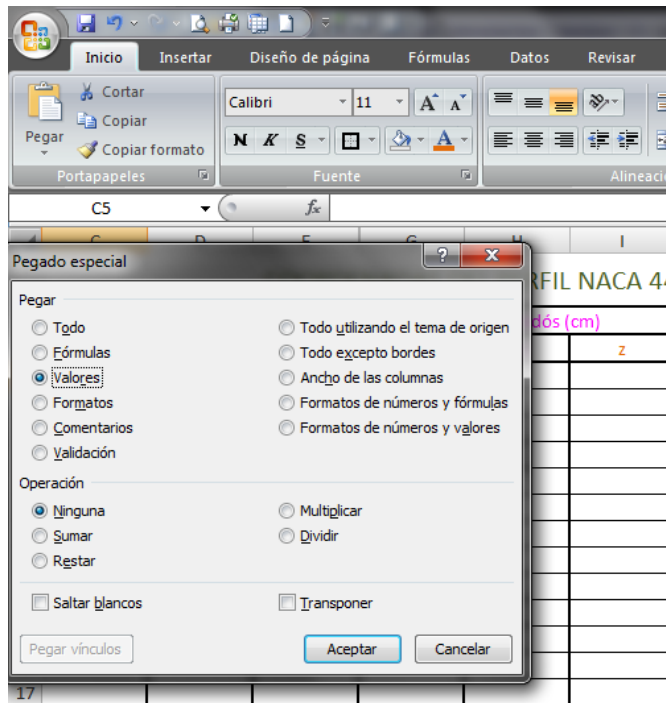


Figura 66. Pegado especial de valores de coordenadas.

Así se obtiene una tabla con los valores de las coordenadas en cm, se debe adicionar una columna en la que consten las coordenadas del eje **z**, en este caso **0**, debido a que el software **CAD** requiere estas coordenadas (**Figura 67.**):

COORDENADAS DEL PERFIL NACA 4415 EN FUNCIÓN DE LA CUERDA RAÍZ												
Puntos Extradós (cm)			Puntos Intradós (cm)			Puntos Extradós (mm)			Puntos Intradós (mm)			
x	y(U)	z	x	y(L)	z	x	y(U)	z	x	y(L)	z	
0	0	0	0	0.000	0							
0.2	0.363	0	0.2	-0.284	0							
0.4	0.523	0	0.4	-0.370	0							
0.6	0.645	0	0.6	-0.420	0							
0.8	0.745	0	0.8	-0.452	0							
1	0.830	0	1	-0.471	0							
1.2	0.902	0	1.2	-0.482	0							
1.4	0.963	0	1.4	-0.484	0							
1.6	1.015	0	1.6	-0.481	0							
1.8	1.058	0	1.8	-0.473	0							

Figura 67. Elaboración de tabla de coordenadas de curvas.

A continuación con el factor de escala **10**, se transforman las unidades a **mm**(**Figura 68.**):

COORDENADAS DEL PERFIL NACA 4415 EN FUNCIÓN DE LA CUERDA RAÍZ												
Puntos Extradós (cm)			Puntos Intradós (cm)			Puntos Extradós (mm)			Puntos Intradós (mm)			
x	y(U)	z	x	y(L)	z	x	y(U)	z	x	y(L)	z	
0	0	0	0	0.000	0	=C5*10						
0.2	0.363	0	0.2	-0.284	0							
0.4	0.523	0	0.4	-0.370	0							
0.6	0.645	0	0.6	-0.420	0							

Figura 68. Aplicación del Factor de escala.

Seguidamente, se copian los valores de las coordenadas que describen las curvas del **extradós e intradós** y se pega en un editor de texto, en este caso el **Bloc de notas** (**Figura 71.**):

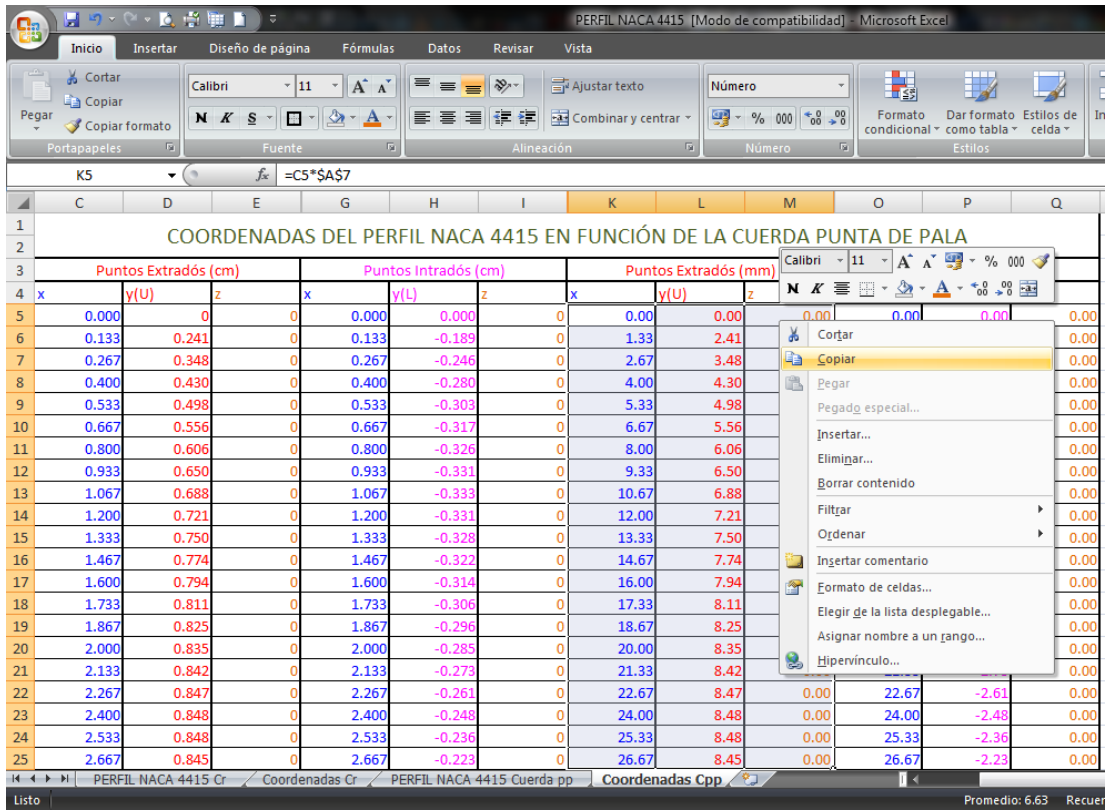


Figura 69. Obtención de los valores de coordenadas de las curvas, en mm.

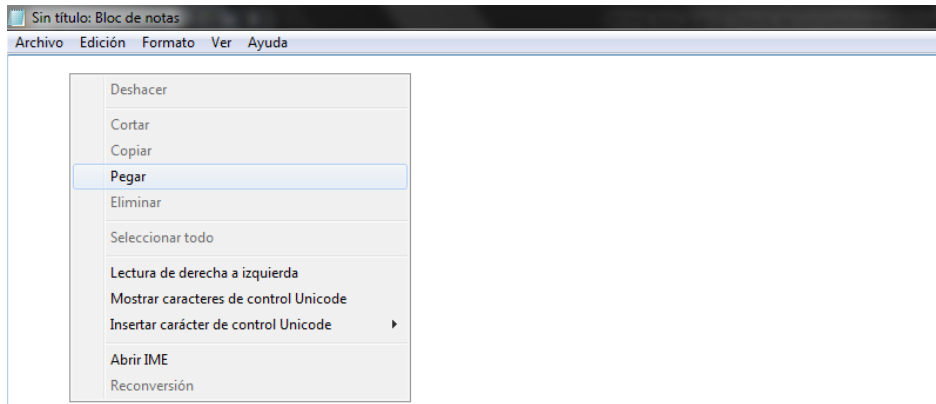


Figura 70. Creación del archivo con extensión “.txt” con los valores de coordenadas de las curvas.

Sin título: Bloc de notas		
Archivo	Edición	Formato Ver Ayuda
0.00	0.00	0.00
1.33	2.41	0.00
2.67	3.48	0.00
4.00	4.30	0.00
5.33	4.98	0.00
6.67	5.56	0.00
8.00	6.06	0.00
9.33	6.50	0.00
10.67	6.88	0.00
12.00	7.21	0.00
13.33	7.50	0.00
14.67	7.74	0.00
16.00	7.94	0.00
17.33	8.11	0.00
18.67	8.25	0.00
20.00	8.35	0.00
21.33	8.42	0.00
22.67	8.47	0.00
24.00	8.48	0.00
25.33	8.48	0.00
26.67	8.45	0.00
28.00	8.40	0.00
29.33	8.33	0.00
30.67	8.24	0.00
32.00	8.13	0.00
33.33	8.00	0.00

Figura 71. Valores de coordenadas en el archivo .txt

Se debe mencionar, que la separación de decimales debe realizarse ya sea con **punto** o **coma**, y estar configurada de igual forma, tanto en **Excel** como en el software **CAD**, en caso de que exista diferencia en este sentido, aparecerán errores al momento de insertar los datos.

Se guarda el documento.

Se ejecuta **SolidWorks**, y se crea un nuevo documento de **pieza**(Figura 72.):

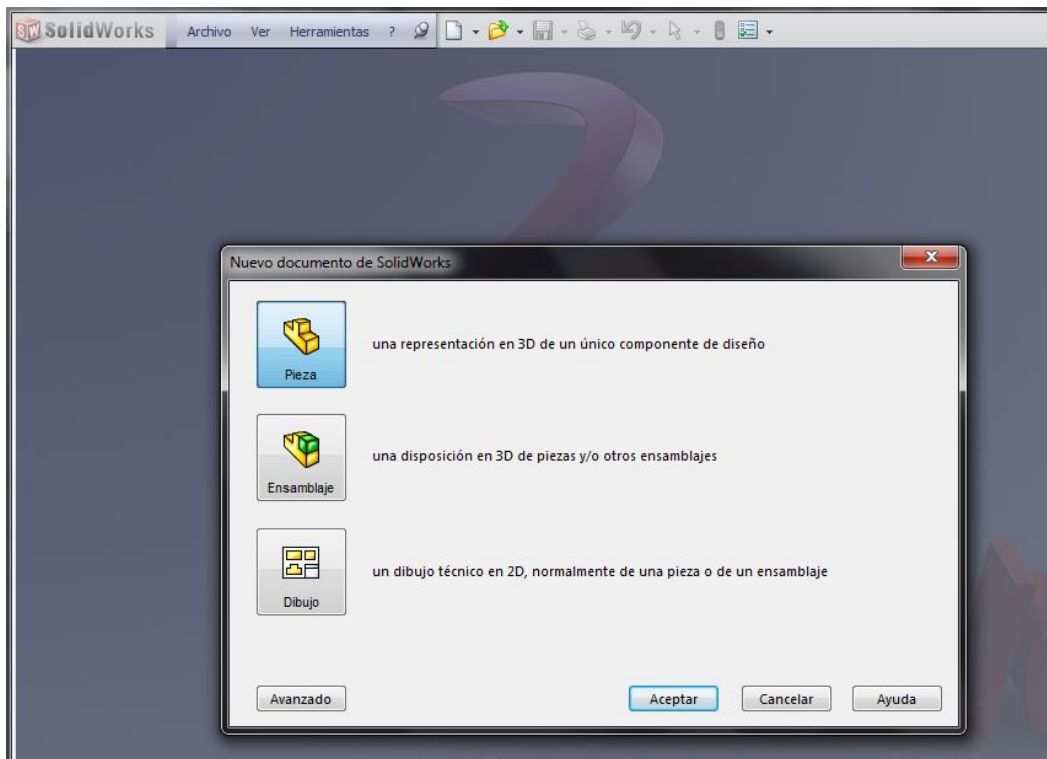


Figura 72. Creación de nuevo documento de pieza.

En la barra de menú principal, se hace clic en **Insertar/Curva/Curva por puntos XYZ** (Figura 73.)

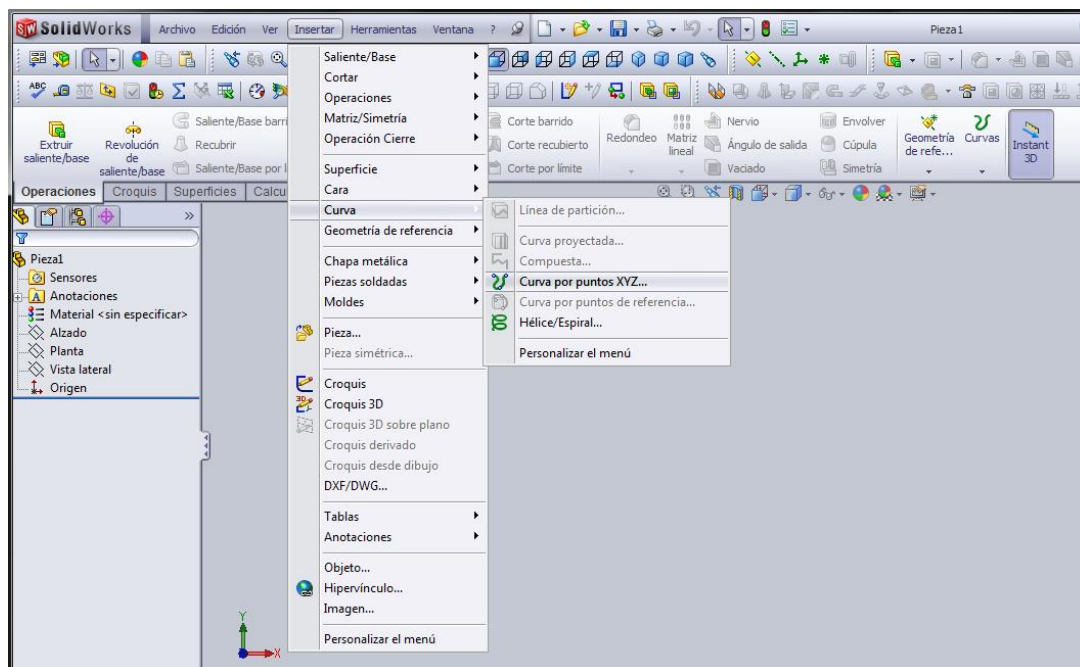


Figura 73. Inserción de Curva por puntos XYZ.

Aparece la ventana **Archivo de curva**, en la cual nos da la opción de insertar las coordenadas manualmente o cargar un archivo con las mismas, para ello hacemos clic en **Examinar...** (**Figura 74.**):

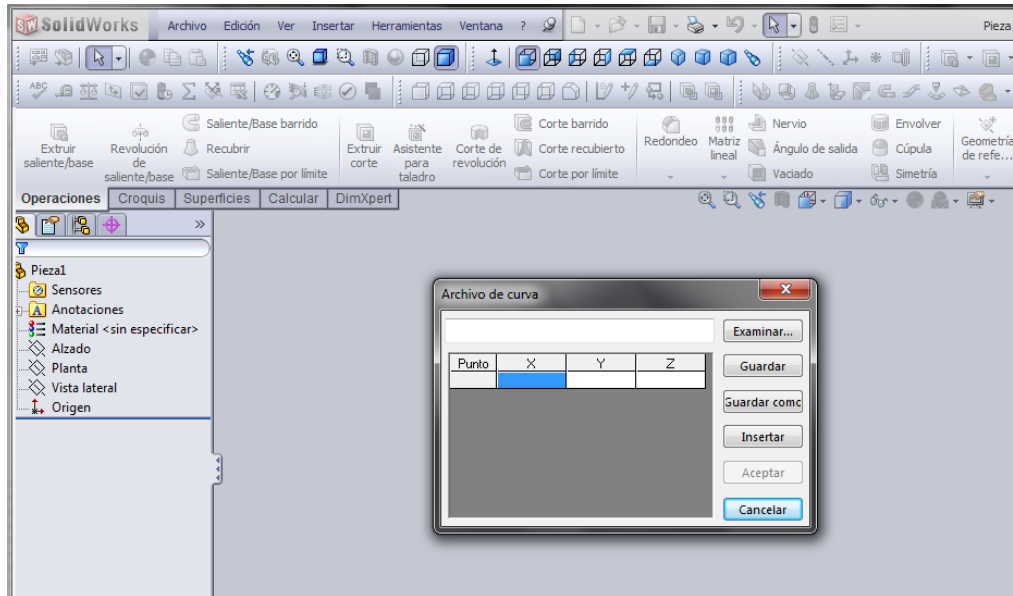


Figura 74. Inserción de archivo de curva.

Se abre una nueva ventana, en la que se debe ubicar el directorio de ubicación del archivo con las coordenadas de la curva a insertar, además se debe seleccionar como tipo de archivo a mostrar, los archivos **Text Files** con extensión **(.txt)**, así se selecciona el archivo antes generado y doble clic (**Figura 75.**):

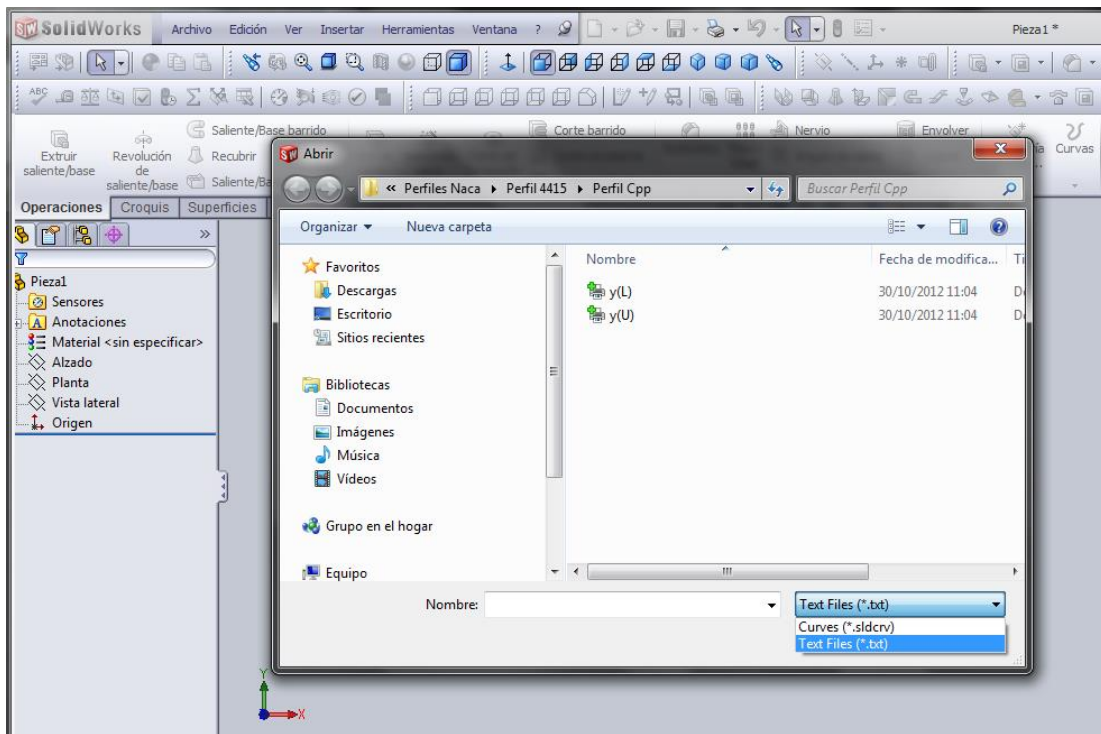


Figura 75. Selección y apertura del archivo de coordenadas.

Inmediatamente aparecerá la ventana de **Archivo de curva**, con las coordenadas, se hace clic en **Aceptar** (Figura 76.):

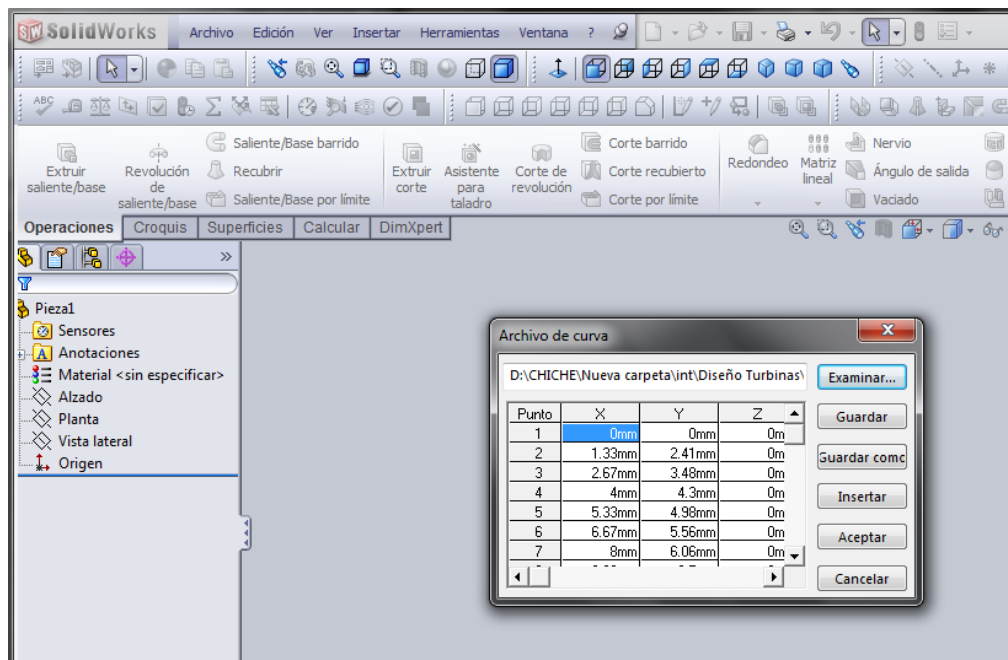


Figura 76. Inserción de coordenadas.



Por defecto, la curva aparecerá en el plano de **Alzado**, para apreciarlo mejor, se hace clic en el plano de **Alzado** en la parte izquierda de la ventana, en la ventana del **Gestor de Diseño del FeatureManager (Figura 77).**

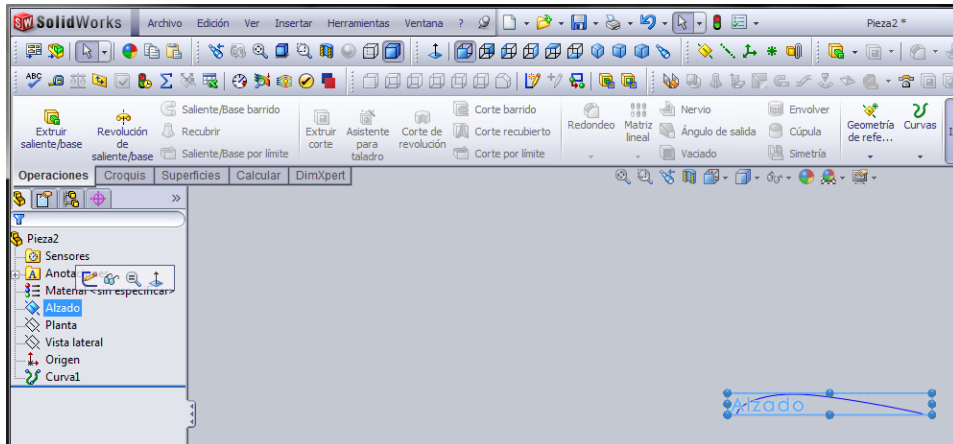


Figura 77. Inserción de la curva.

Se procede de igual forma, para insertar las curvas restantes, es decir, la curva del intradós en función de la cuerda raíz, y las curvas del extradós e intradós en función de la cuerda punta de pala. Así, se obtendrá lo siguiente:

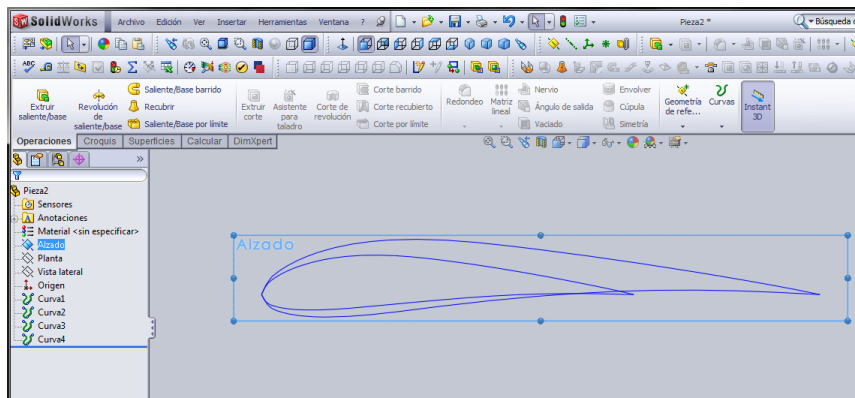


Figura 78. Inserción de las cuatro curvas de los perfiles.

Éstas, son solo las curvas, se debe convertir las entidades para que se transformen en líneas **spline** y poder crear el modelo de la pala.

- Lo siguiente es convertir las entidades, para ello, se selecciona el plano de **Alzado**, luego se hace clic en la barra de **Croquis/Croquis**, se selecciona una de las curvas y clic en **Convertir Entidades**, con lo cual la curva se convertirá en una línea **spline**(Figura 79.):

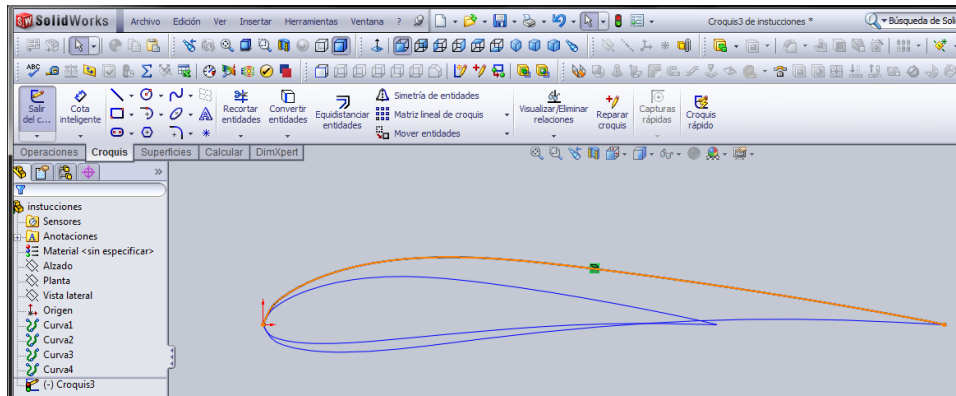


Figura 79. Conversión de entidades.

Seguidamente se elimina las relaciones existentes ligadas a la nueva entidad, para esto, se hace doble clic sobre la nueva entidad (línea spline). Aparecerá una ventana en la parte izquierda de la interfaz del programa, esta es la ventana del **PropertyManager**, y muestra las relaciones existentes (**Figura 80.**):

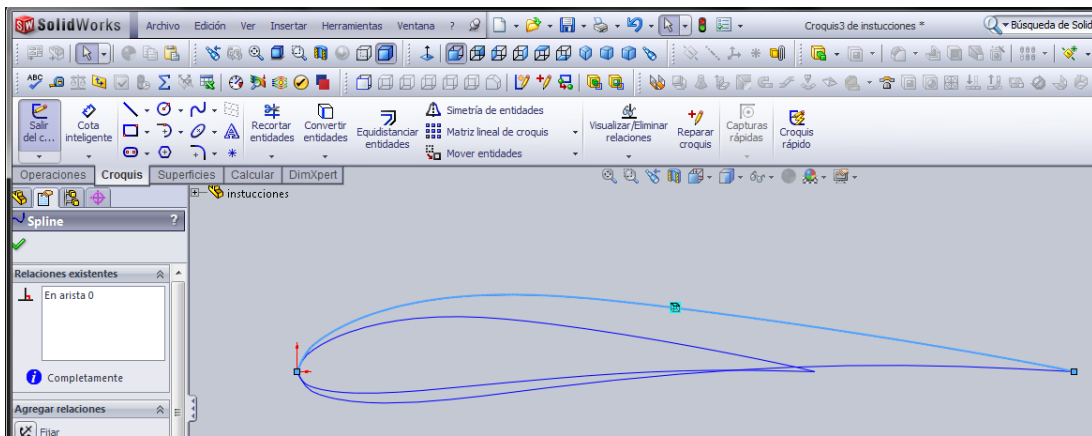


Figura 80. Eliminación de relaciones.

Se selecciona la relación perteneciente a la **spline**, clic derecho, y **Eliminar** (**Figura 81.**):

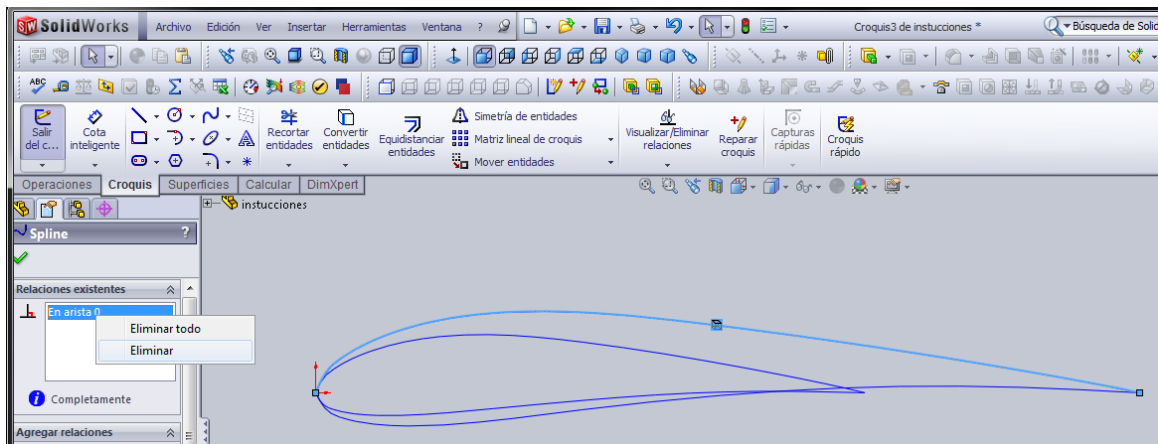


Figura 81. Eliminación de relaciones.

Eliminando todas las relaciones de las cuatro entidades, se reducen las posibilidades de generar conflictos o errores al momento de generar un sólido en base a dichas entidades.

Se procede de igual forma para las curvas restantes, es decir se convierte las curvas insertadas en líneas **spline**.

Para evitar confusiones, se ocultan las curvas insertadas anteriormente, para ello en la parte izquierda, en la ventana del **Gestor de Diseño del FeatureManager**, se selecciona cada una de las curvas, clic derecho y clic en el icono de **ocultar**(**Figura 82.**):

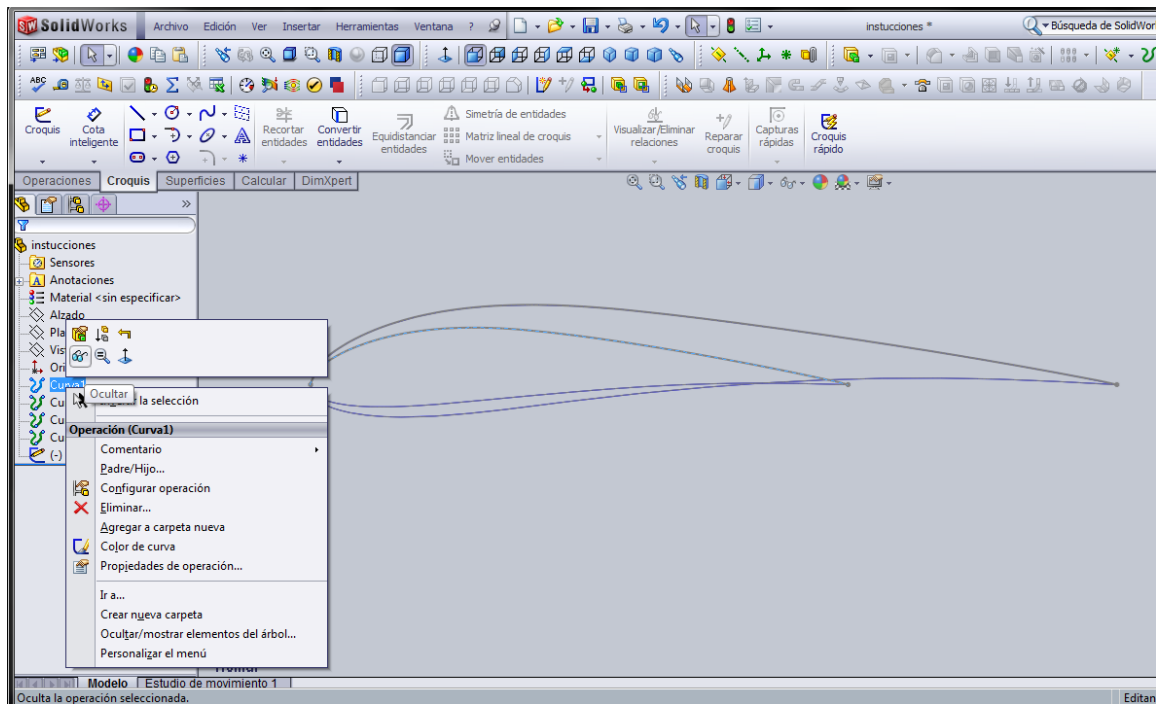


Figura 82. Ocultar curvas.

3. A continuación, se traslada las líneas **spline** a un plano de referencia ubicado a una distancia igual a la longitud útil de la pala, en este caso 690mm, para ello, salimos del **croquis** en el cual tenemos actualmente las líneas **spline**. Luego clic en la barra principal en **Insertar/Geometría de Referencia/Plano**(Figura 83.):

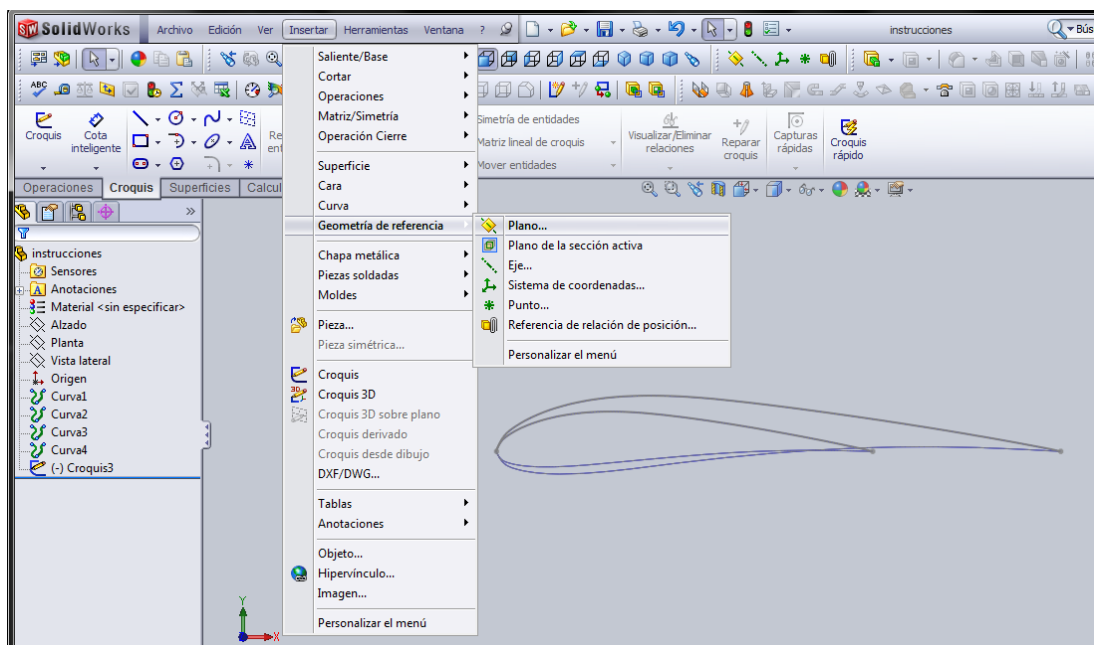


Figura 83. Insertar Plano de referencia.

Se abrirá una ventana en la parte izquierda, en el **PropertyManager**, para tener una mejor vista, hacemos clic en **Isométrica** o **Ctrl+7**, (**Figura 84**):

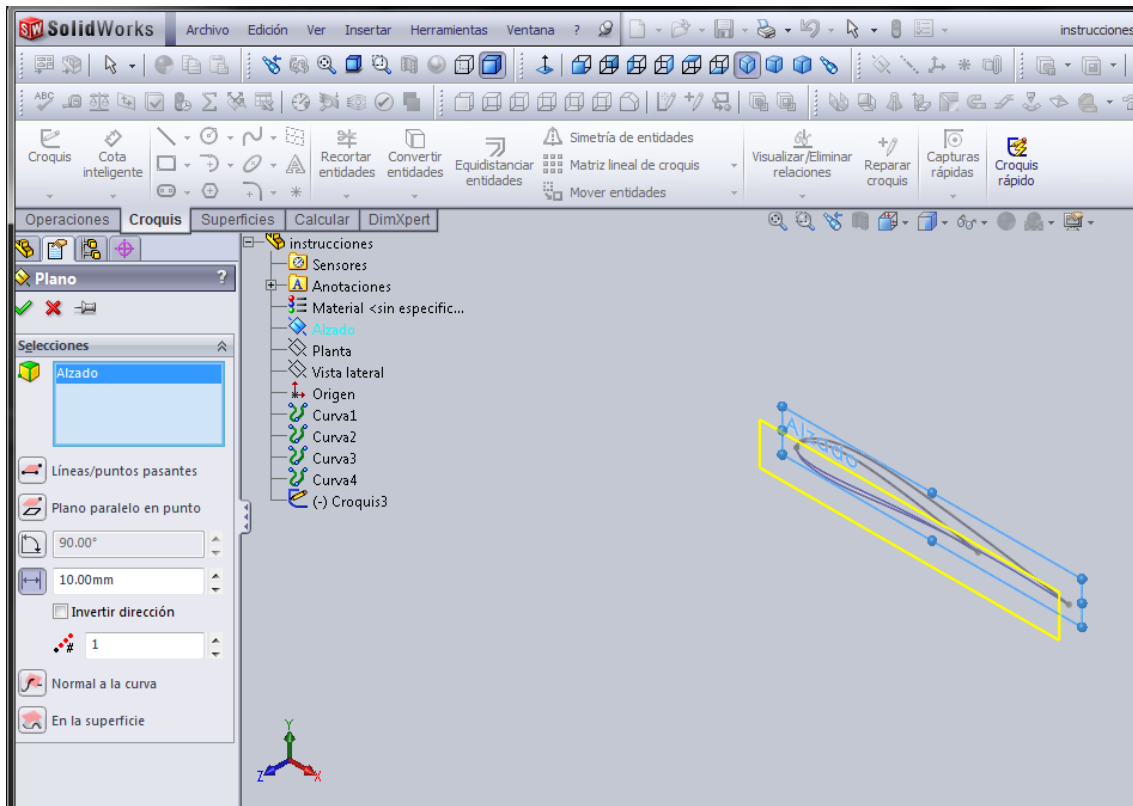


Figura 84. Insertar Plano de referencia.

Se hace clic en el **Gestor de Diseño del FeatureManager**, clic en el plano de **Alzado**, con esto en la parte de **Selecciones-Entidades de referencia**, aparecerá **Alzado**, y un plano con perfil amarillo paralelo a dicho plano, se hace clic en **Invertir dirección** y en **Equidistancia** se coloca el valor de 690mm:

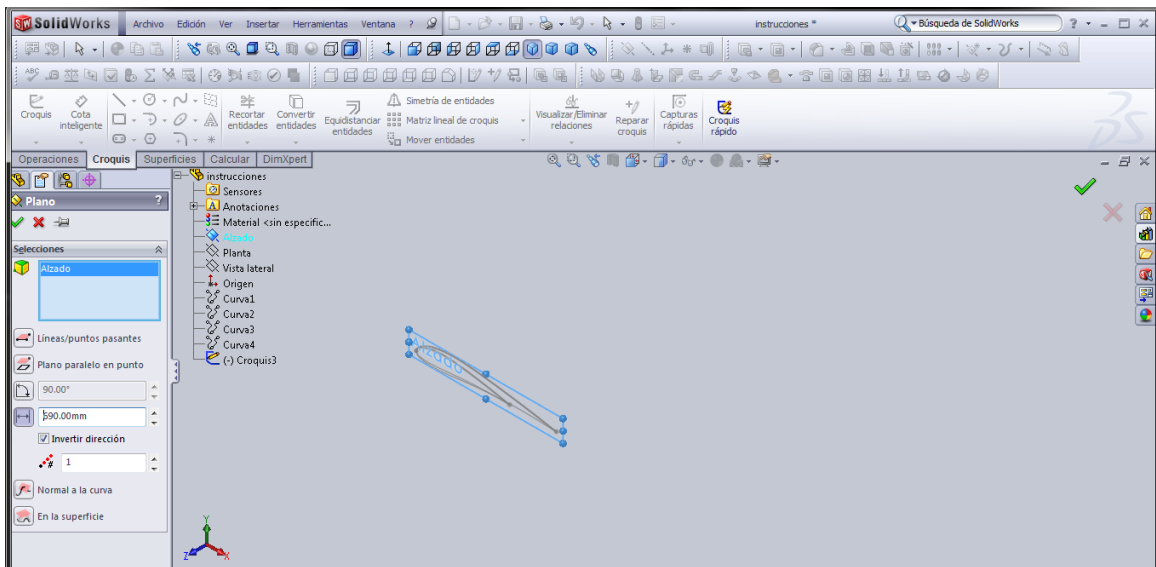


Figura 85. Insertar Plano de referencia.

Si no se visualiza el plano creado, se acerca o aleja utilizando el **scroll** del **mouse**:

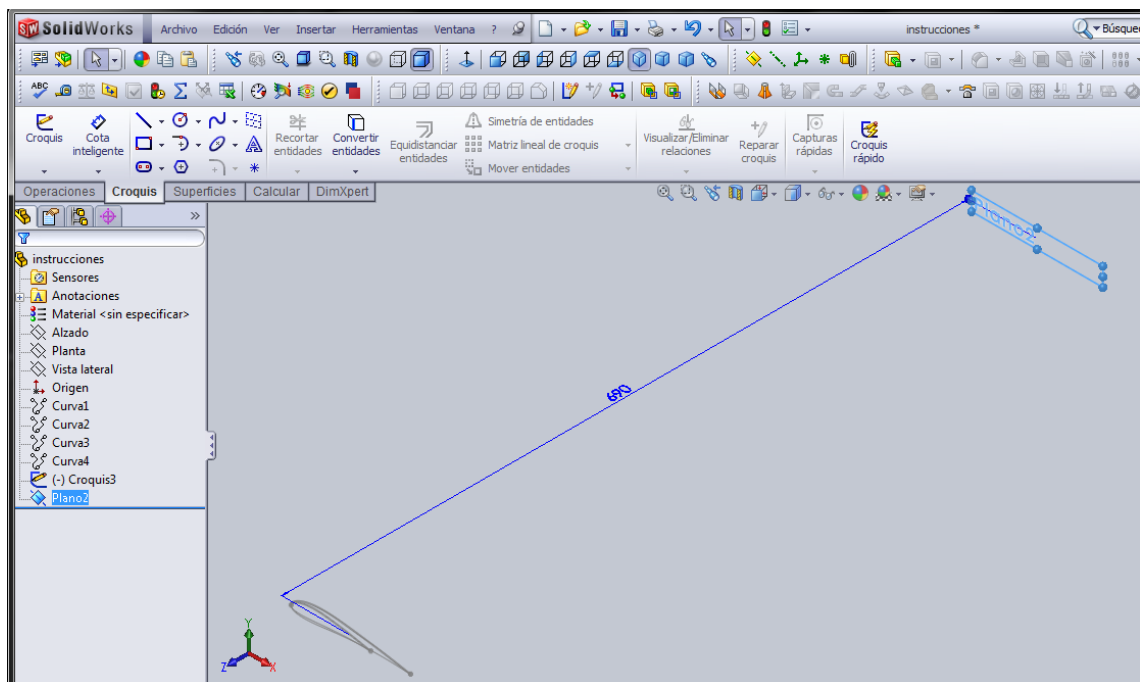


Figura 86. Plano de referencia insertado.

Así se obtiene un plano paralelo al plano de **Alzado** ubicado a una distancia de 60mm. En este plano se proyectaran las curvas del perfil en función de la cuerda punta de pala. Para esto se realiza lo siguiente:

Se selecciona el plano de referencia, luego clic en **Croquis**, se selecciona la curva del extradós del perfil en función de la cuerda punta de pala, luego clic en

**Convertir entidades**, a lo que aparecerá una ventana de **solucionar ambigüedad**(Figura 87.):

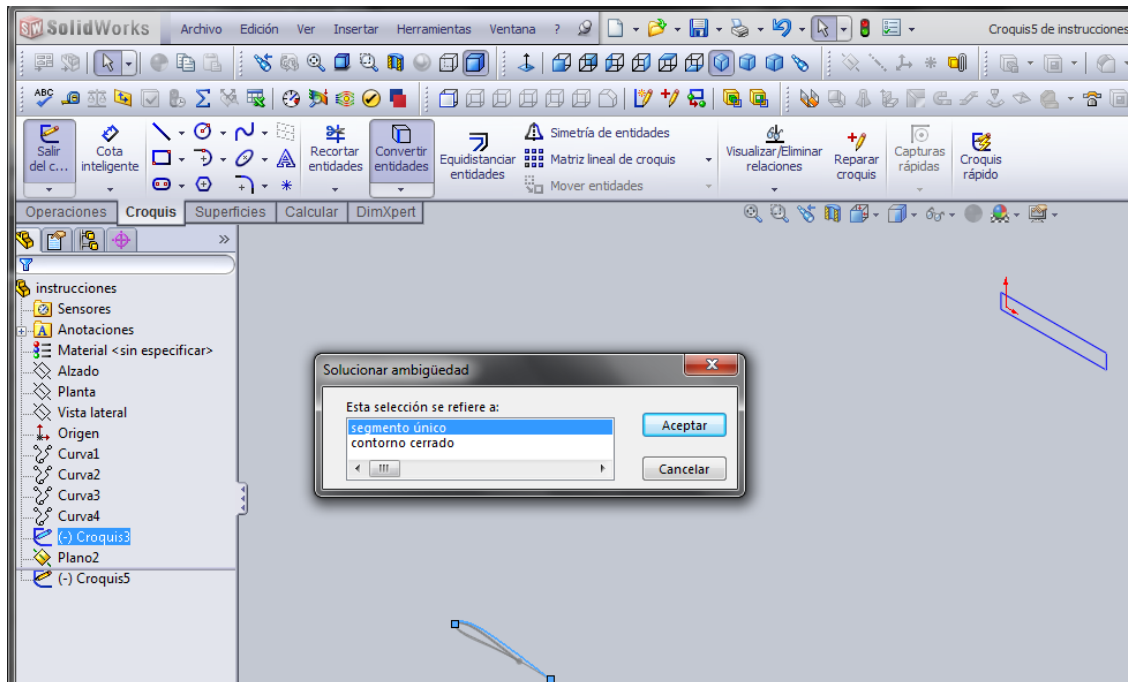


Figura 87. Traspaso de curvas al plano insertado.

Se hace clic en **contorno único** y **Aceptar**.

De esta manera obtendremos la línea spline proyectada en el nuevo plano. Se procede de igual forma para proyectar la curva restante, la del intradós.

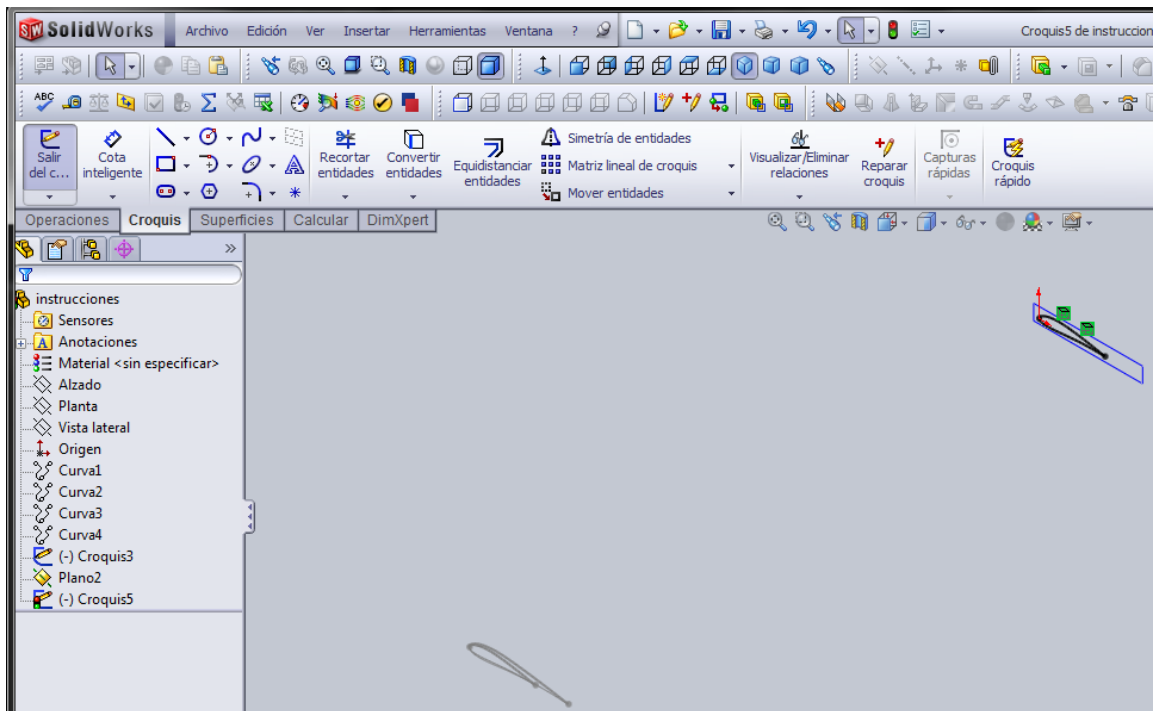


Figura 88. Perfil completo en el plano insertado.

Se eliminan las relaciones que aparecen por defecto en cada línea spline (doble clic en los cuadrados color verde sobre dichas líneas, se abrirá el **PropertyManager**, clic derecho y **eliminar**, (Figura 89).



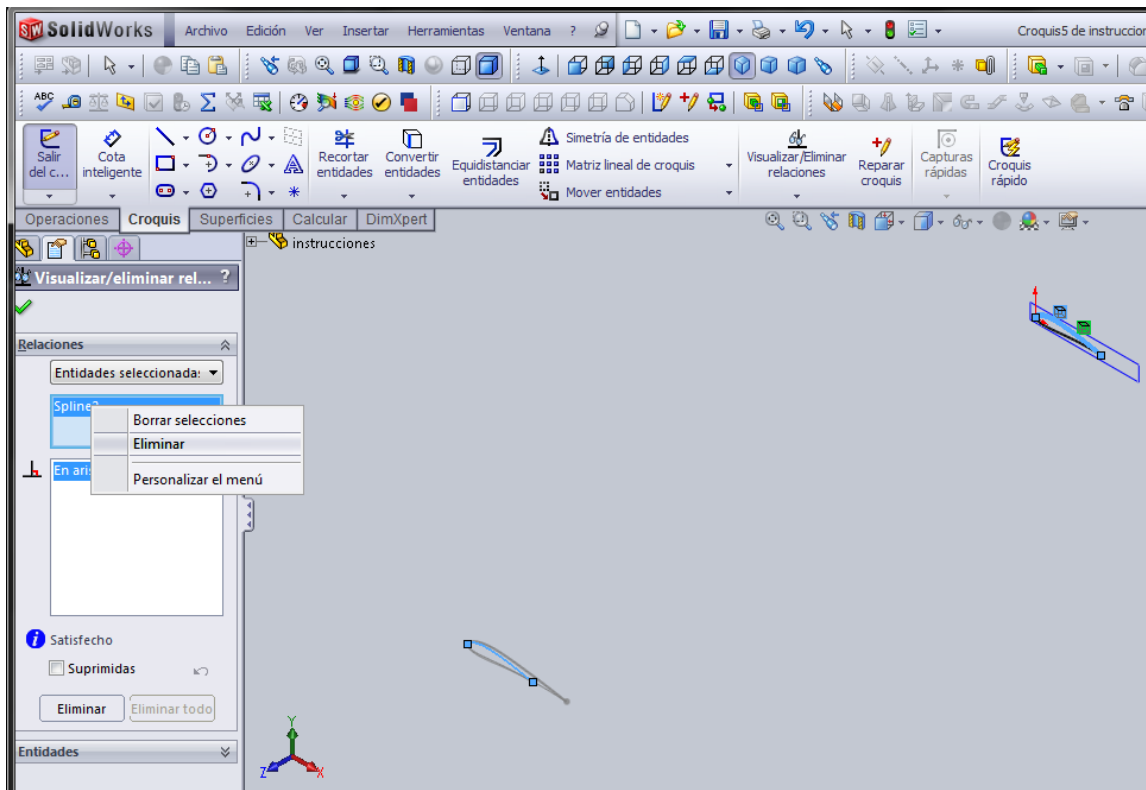


Figura 89. Eliminación de relaciones.

Para evitar confusiones, se elimina las curvas en función de la cuerda punta de pala del plano **Alzado**, para esto se hace doble clic sobre una de estas curvas, hasta que se abra el croquis correspondiente, luego clic sobre una de las curvas a eliminar y **Supr**, o clic derecho sobre la curva a eliminar y **Eliminar**.

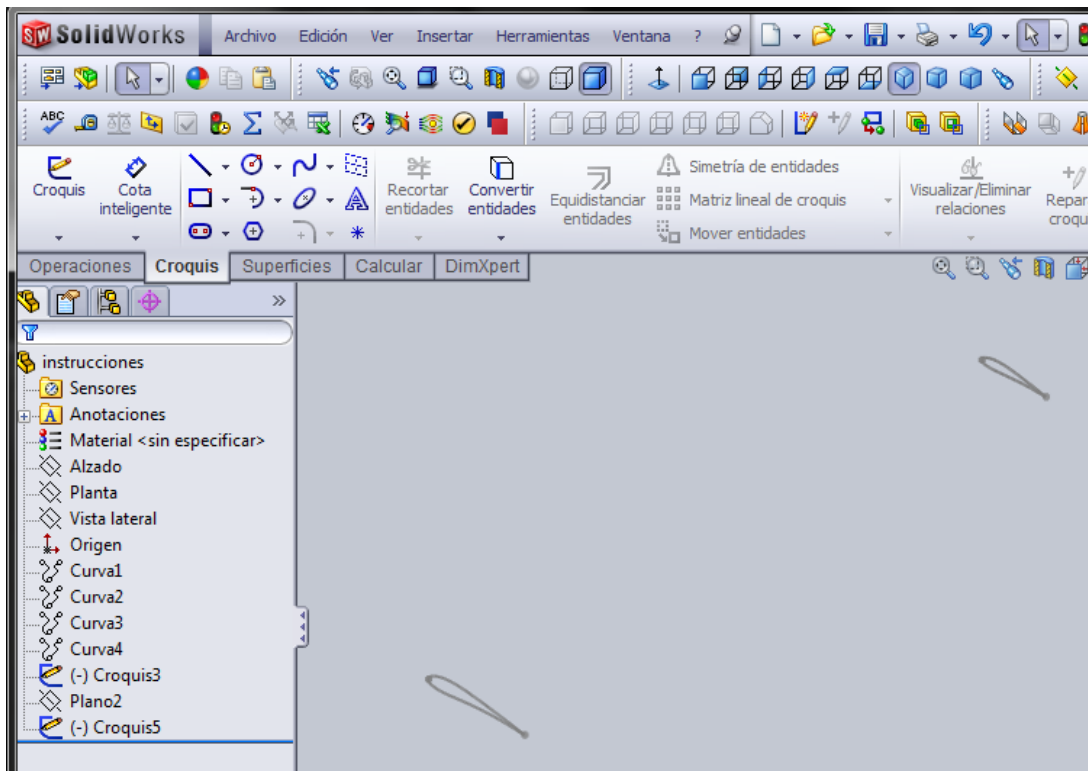


Figura 90. Perfiles finales.

Luego, se debe agregar una relación de coincidencia en los puntos de intersección entre el extradós e intradós, por la parte del borde de salida. Para esto se edita cualquiera de los dos croquis, ya sea el del perfil en función de la cuerda raíz o de la cuerda punta de pala. Se hace clic en dicho punto, se mantiene presionada la tecla **Ctrl**, y se selecciona el punto homólogo, aparecerán las **Propiedades** en la ventana del **PropertyManager**, en **Agregar relaciones** se hace clic en **Coincidente** y luego se sale del croquis, de esta manera la recta del borde de salida será perpendicular a ambos planos(**Figura 91.**):

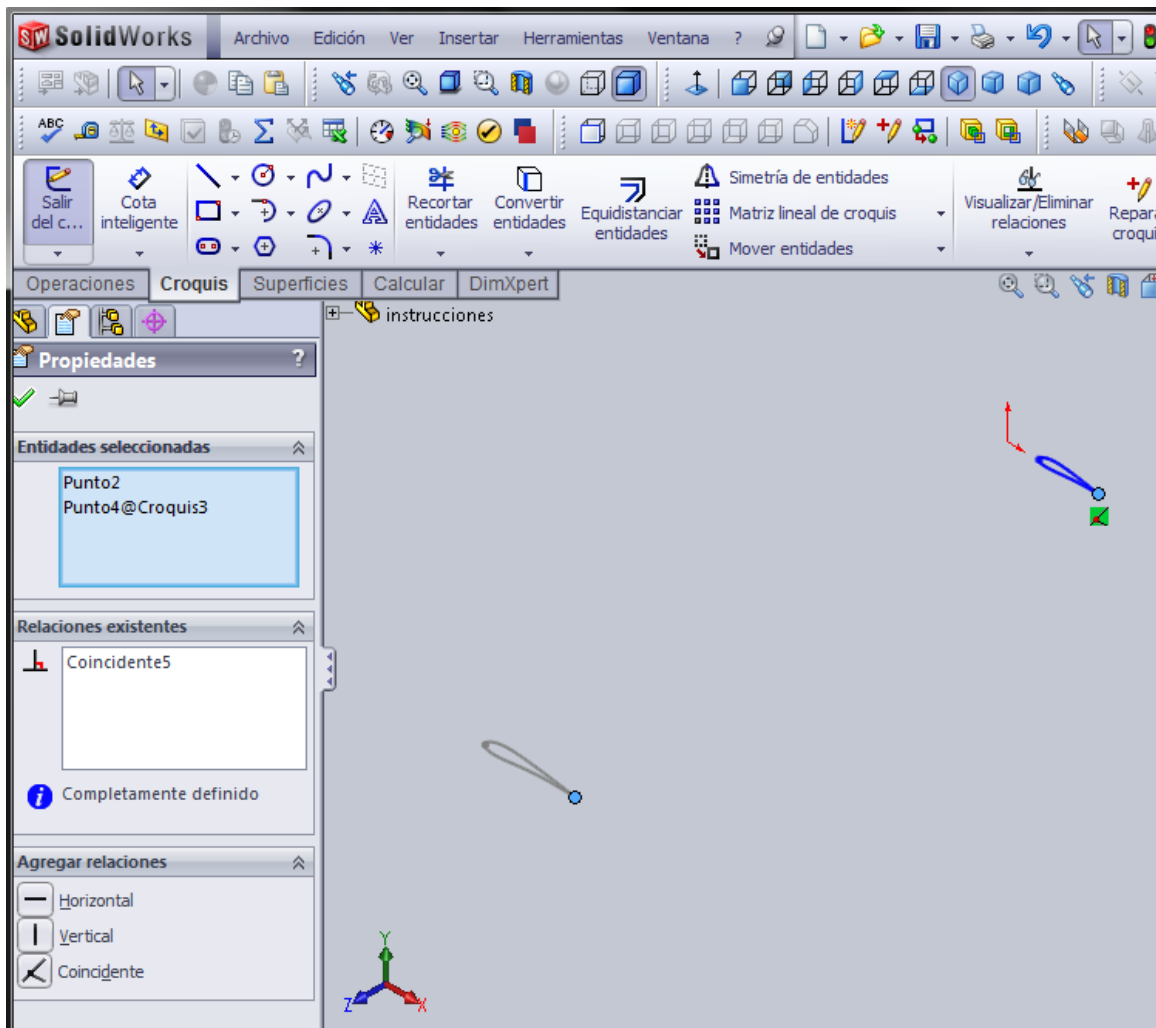


Figura 91. Relación de perpendicularidad entre el borde de salida y los planos de los perfiles.

4. Lo siguiente es, en base a estos dos grupos de contornos, crear un sólido, para esto, se hace clic en la pestaña de **Operaciones**, luego clic en la operación **Recubrir**, se selecciona primero el perfil en función de la cuerda raíz y luego en el perfil en función de la cuerda punta de pala, automáticamente se generará un sólido en función de estos perfiles. Cabe resaltar que se debe seleccionar las curvas de forma correspondiente, es decir si se hace clic sobre la curva del extradós en el primer conjunto, luego se debe hacer clic sobre el extradós del segundo conjunto (**Figura 92**).

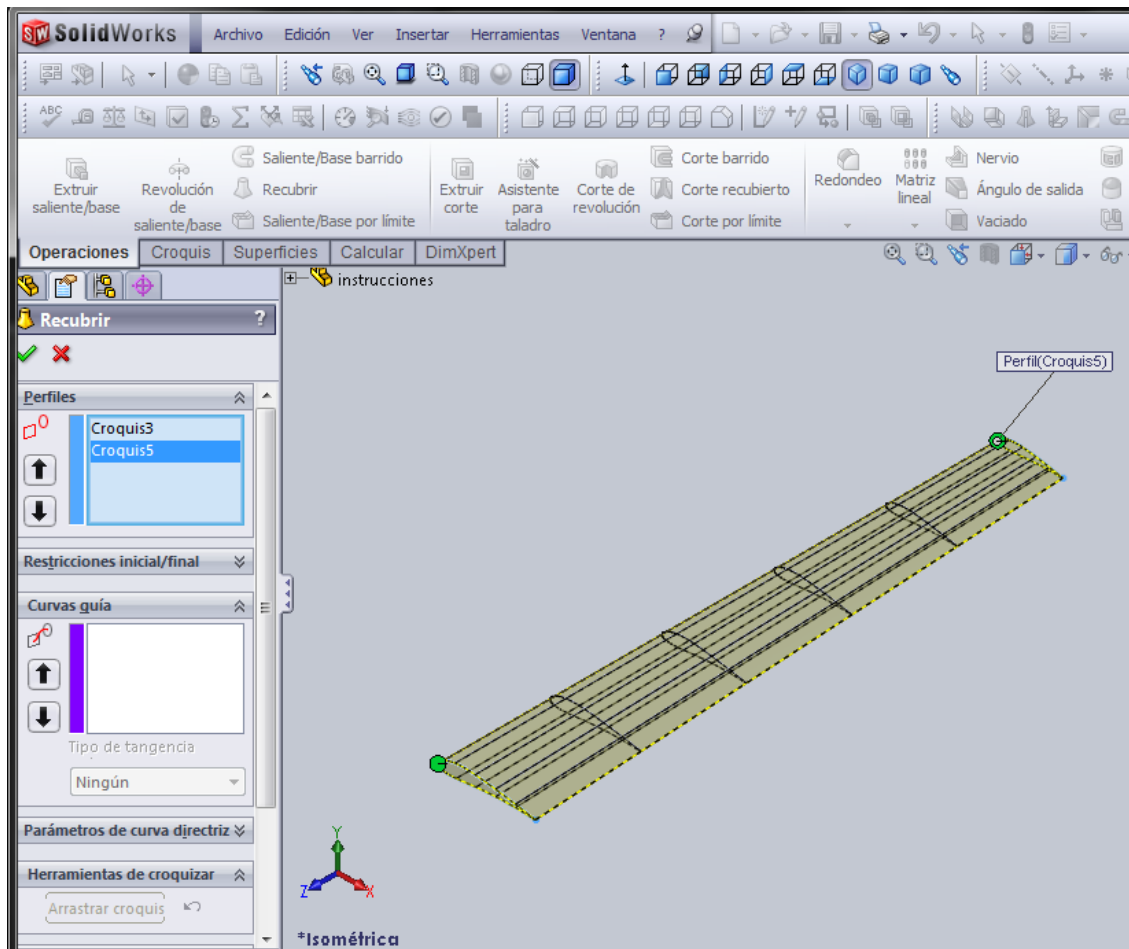


Figura 92. Operación Recubrir.

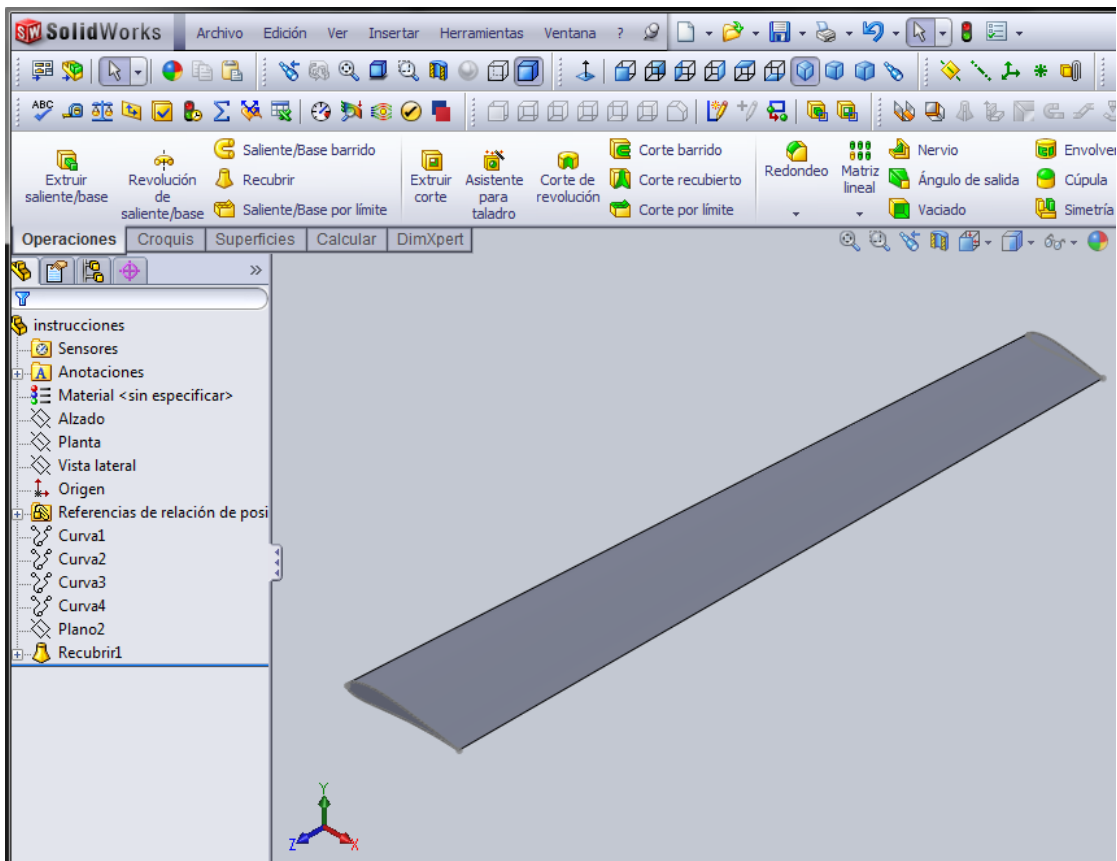


Figura 93. Modelo del sólido en base a los perfiles.

5. A continuación, se procede a crear la raíz de la pala. Para esto insertamos un plano de referencia al plano **Alzado**, ubicado a 90mm de este último (longitud de la raíz de pala). Se hace clic en **Insertar/Geometría de referencia/plano**. Luego se coloca la cantidad de 90mm y clic en el visto color verde en la esquina superior izquierda (**Figura 94.**):

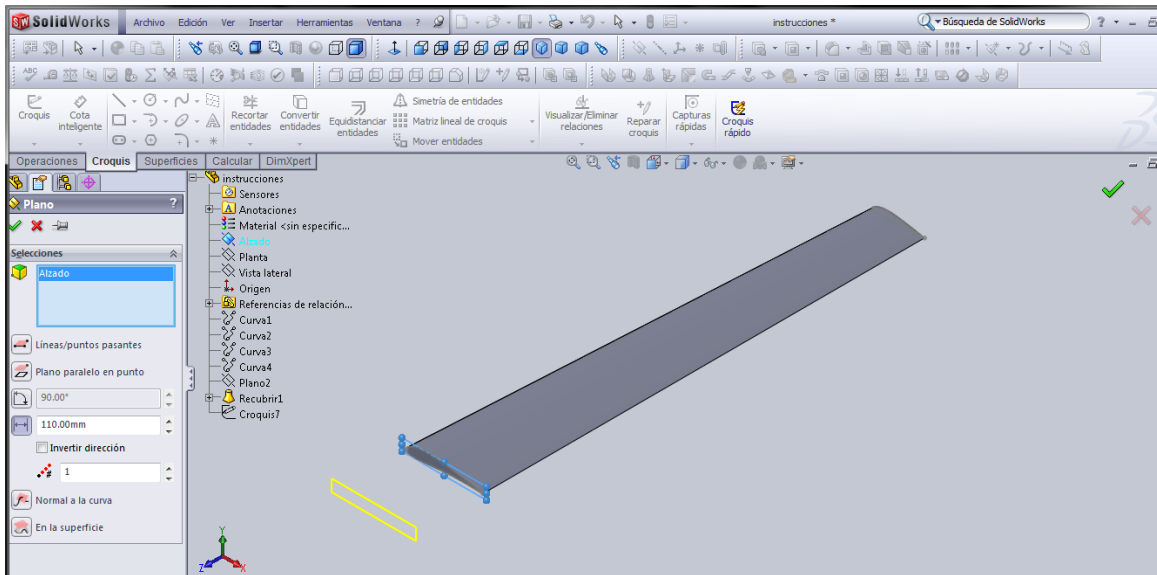


Figura 94. Inserción de un segundo plano de referencia.

Lo siguiente es trasladar la superficie comprendida entre las curvas del perfil de la cuerda raíz. Para esto seleccionamos el nuevo plano insertado, clic en **Croquis/Croquis**, y seleccionamos la superficie que se quiere trasladar (**Figura 95**):

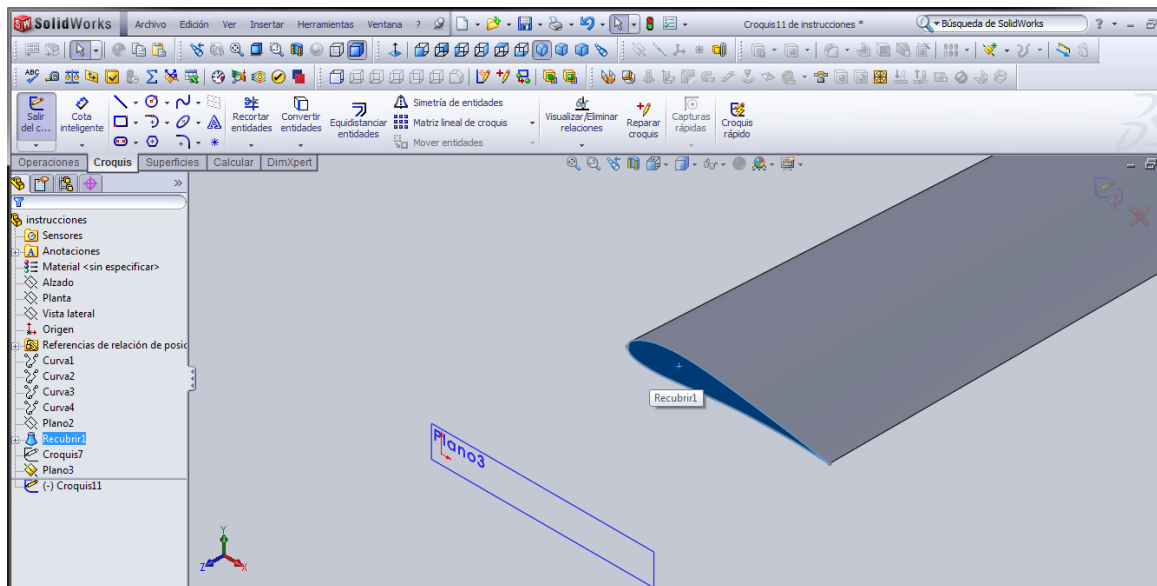


Figura 95. Traslado de una superficie a un plano de referencia.

Se hace clic en **convertir entidades**, e inmediatamente aparecerá el perfil de la superficie en el nuevo plano (**Figura 96**):

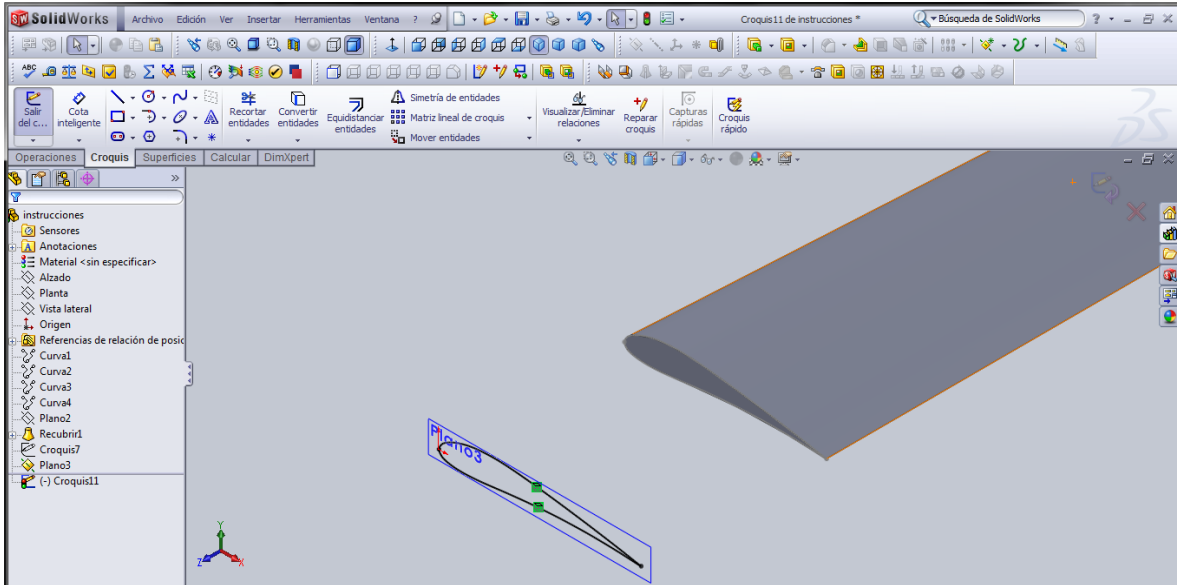


Figura 96. Traslado de una superficie a un plano de referencia.

Luego se crea un croquis en este último plano, se traza un círculo procurando que su centro quede alineado con la cuerda del perfil, y en una posición central, en este caso ubicado a 50mm de la línea por la que pasa el borde de ataque. Para esto, se hace clic en el plano de referencia, clic en **Croquis/Croquis, Círculo**. (**Figura 97**):

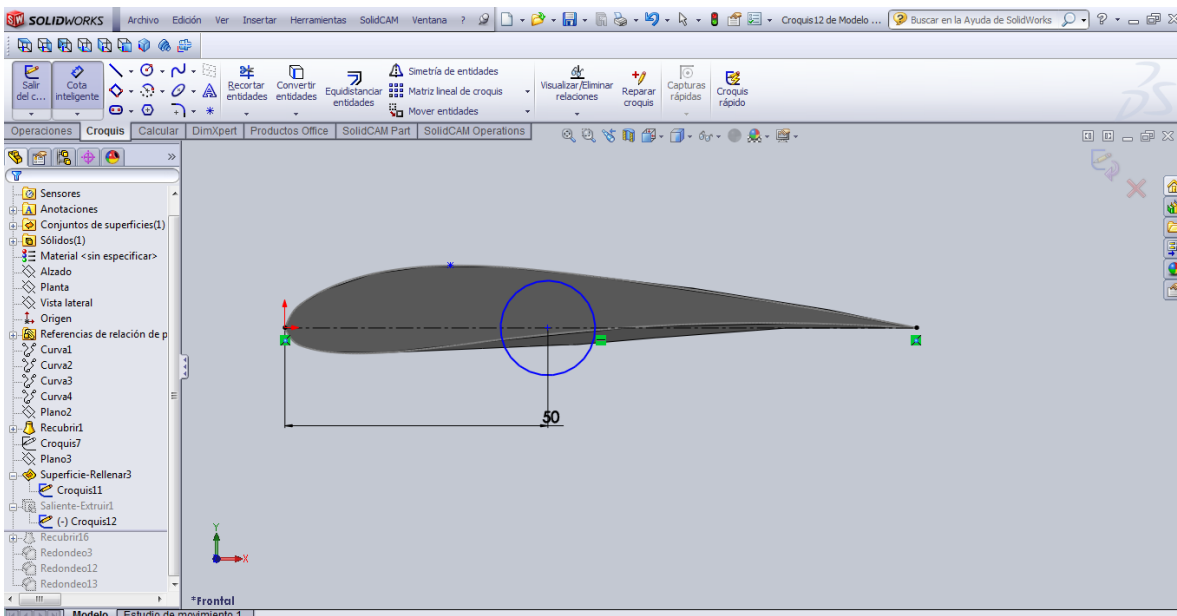


Figura 97. Diseño de la raíz de la pala.

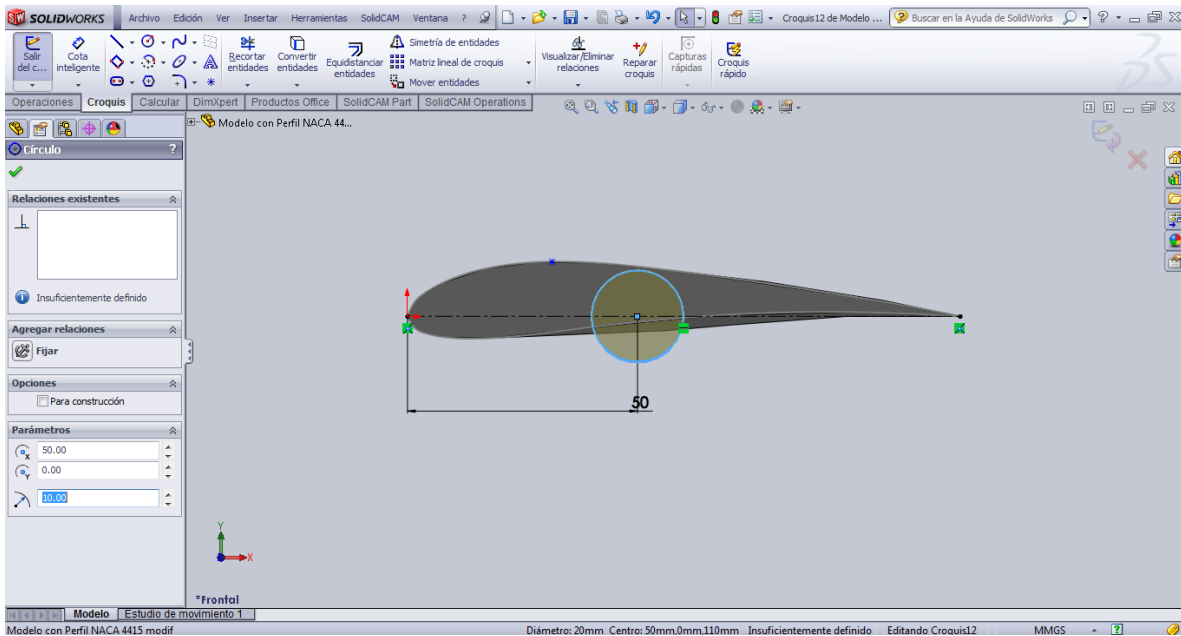


Figura 98. Base de la raíz de la pala.

Luego se modifica el radio del círculo, en la pestaña de **parámetros** del **PropertyManager (Figura 98).**

Se oculta el plano, clic en un borde y clic en el icono **ocultar**.

Luego se aplica una operación de extrusión al círculo creado, clic en la pestaña **Operaciones/Extruir Saliente-Base**, se especifica la **profundidad** y **dirección** deseadas y **aceptar (Figura 99):**



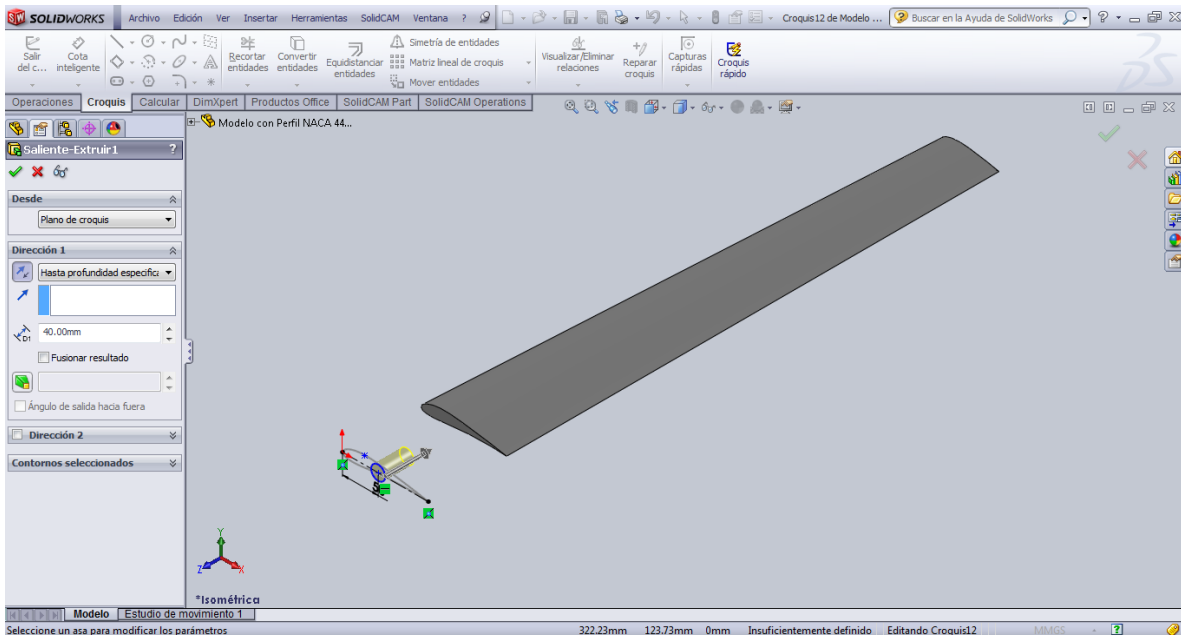


Figura 99. Extrusión de la base de la raíz de la pala.

Se tendrá un cilindro y la pala (**Figura 100.**):

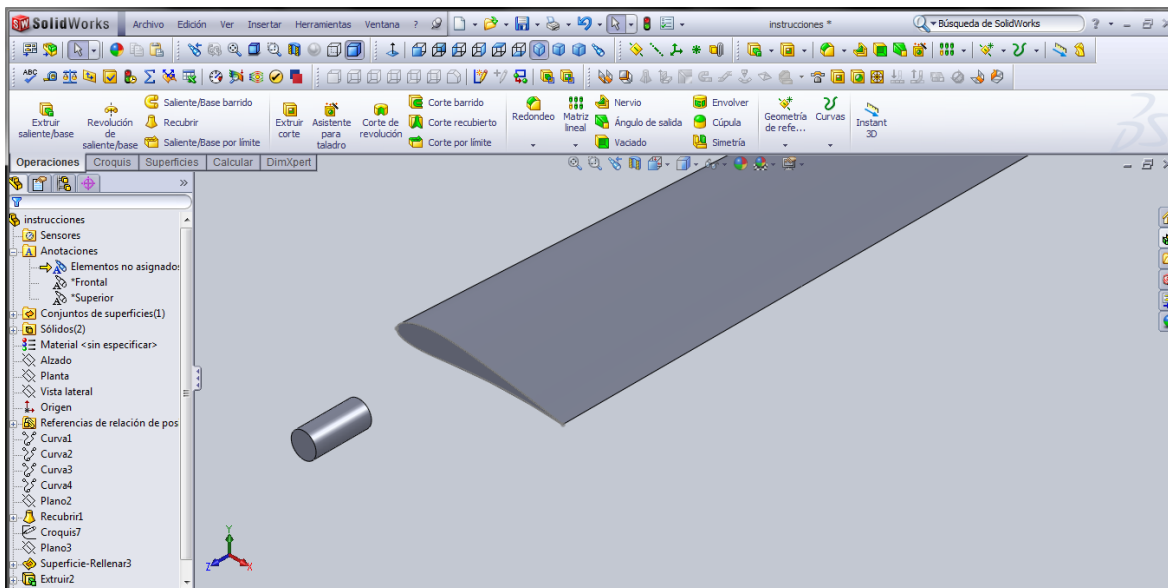


Figura 100. Base de la raíz de la pala.

Para completar el modelo y eliminar el espacio existente entre el cilindro y la pala, se aplica la operación de recubrir, para esto, clic en la pestaña Operaciones/Recubrir, y se selecciona la arista circular del cilindro y el perfil de la pala, que limitan el espacio existente, y aceptar (**Figura 101.**):

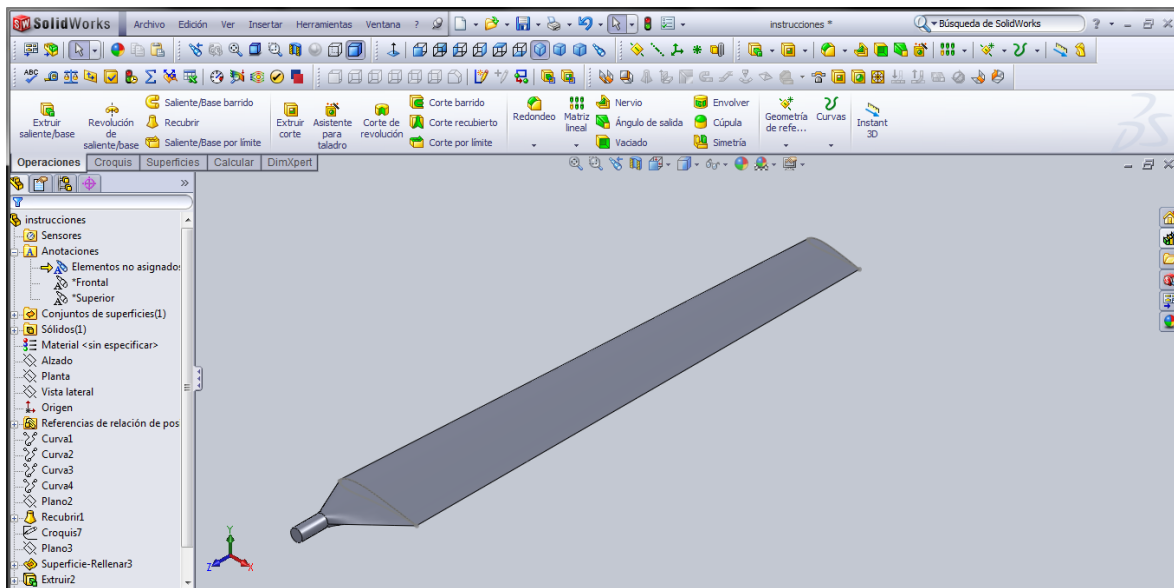


Figura 101. Pala completa.

Se tendrá la pala completa, lo siguiente es aplicar una operación de redondeo en el borde de ataque, ya que de esta manera se mejora el rendimiento con diferentes ángulos de ataque. El borde de salida se debe mantener afilado para reducir la resistencia al avance, ya que la corriente de aire no rodeara la pala.

6. Para esto se hace clic en la pestaña de **Operaciones/Redondeo**, se selecciona el borde a redondear, se mostrara una vista preliminar de la operación, se ingresa el valor del diámetro de redondeo y aceptar (**Figura 102.**).

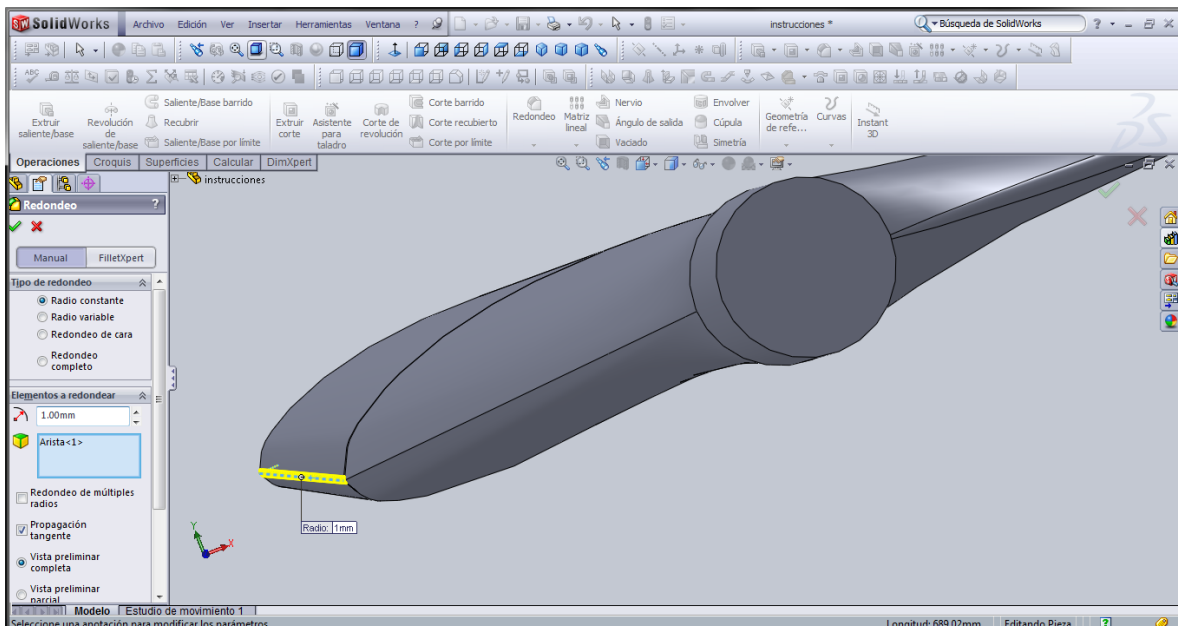


Figura 102. Redondeo del borde de ataque.

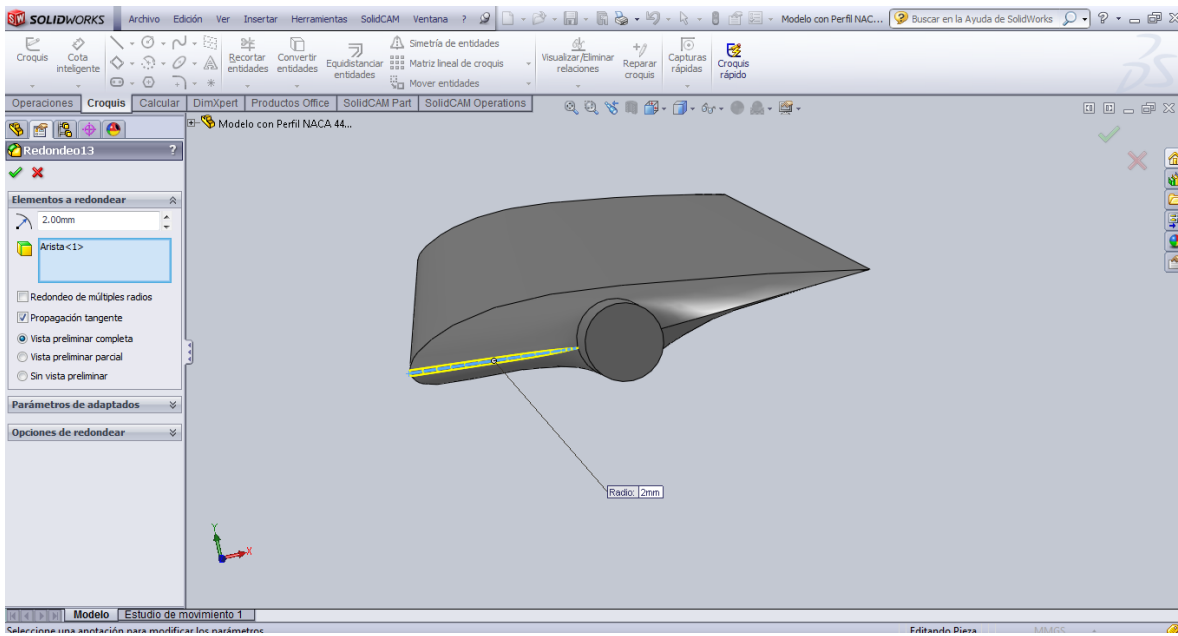


Figura 103. Redondeo del borde de ataque.

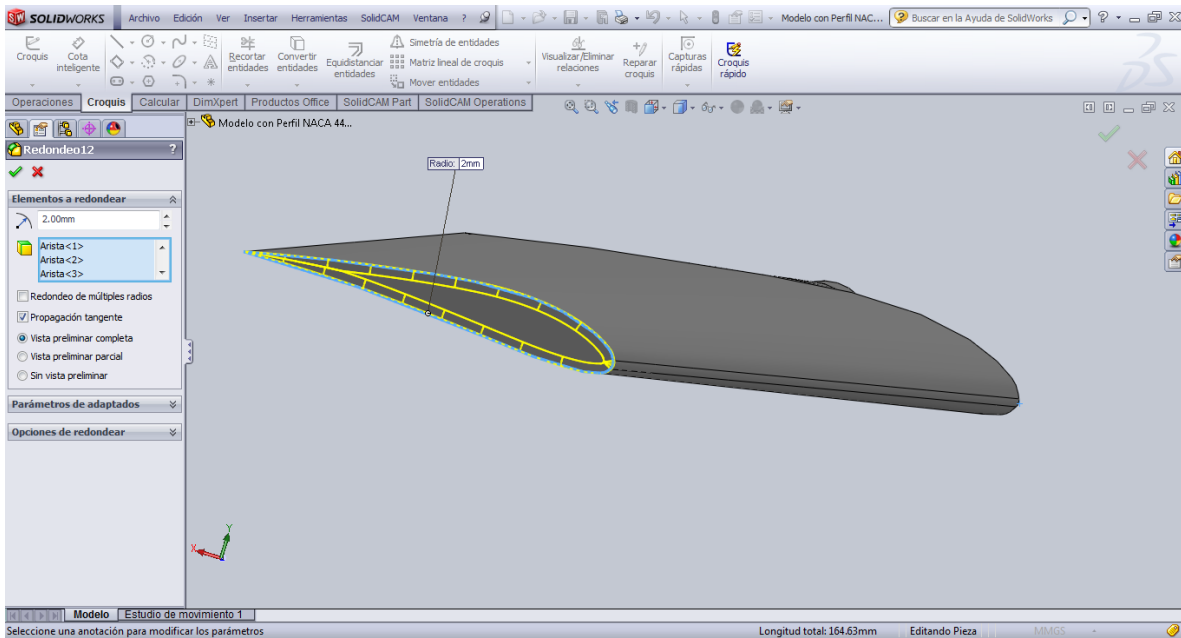


Figura 104. Redondeo de la punta de pala.

Al finalizar las operaciones se tendrá un modelo de pala para turbinas eólicas en base al perfil alar NACA 4415:

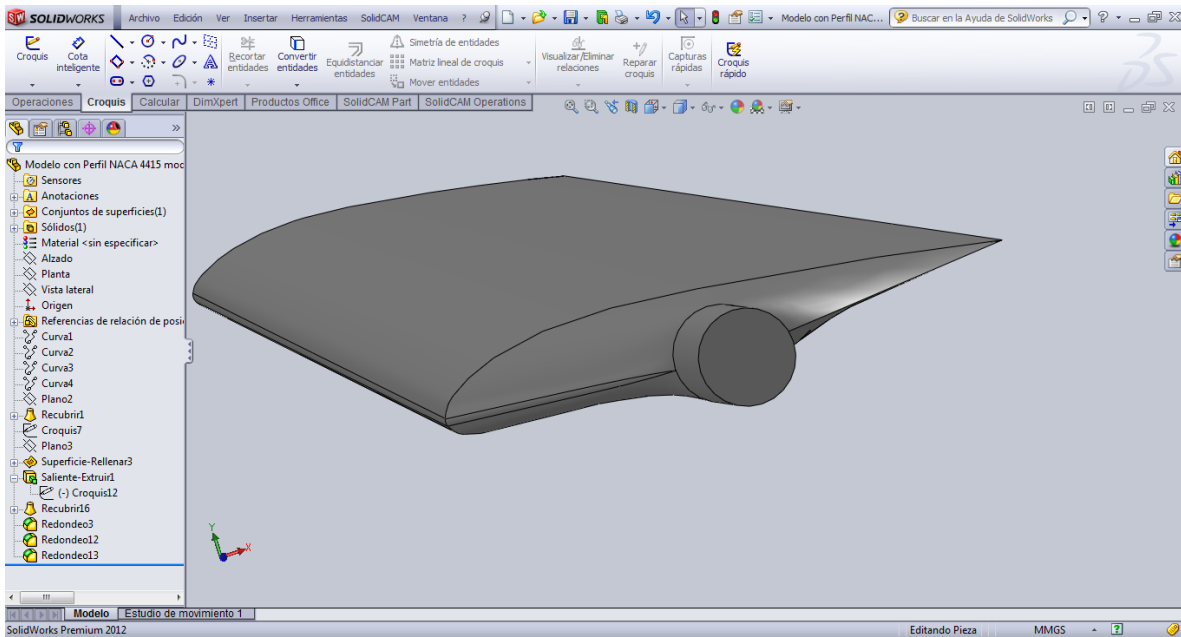


Figura 105. Modelo con redondeos finalizados.

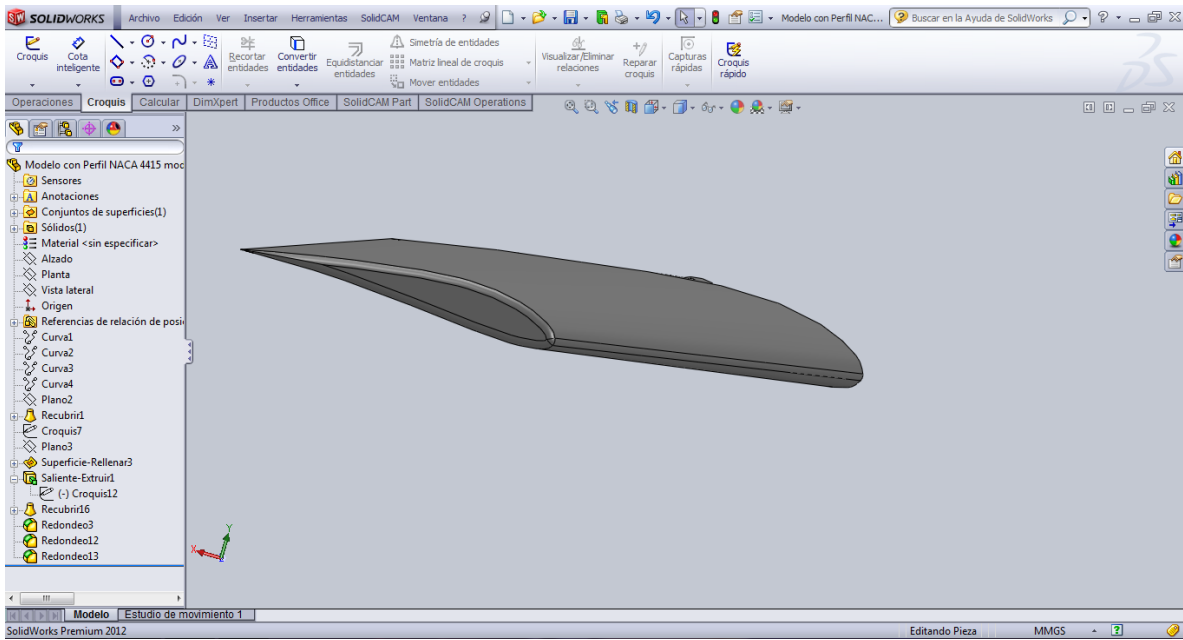


Figura 106. Modelo con redondeos finalizados.

Se tendrá el modelo finalizado en CAD (**Figura 107.**):

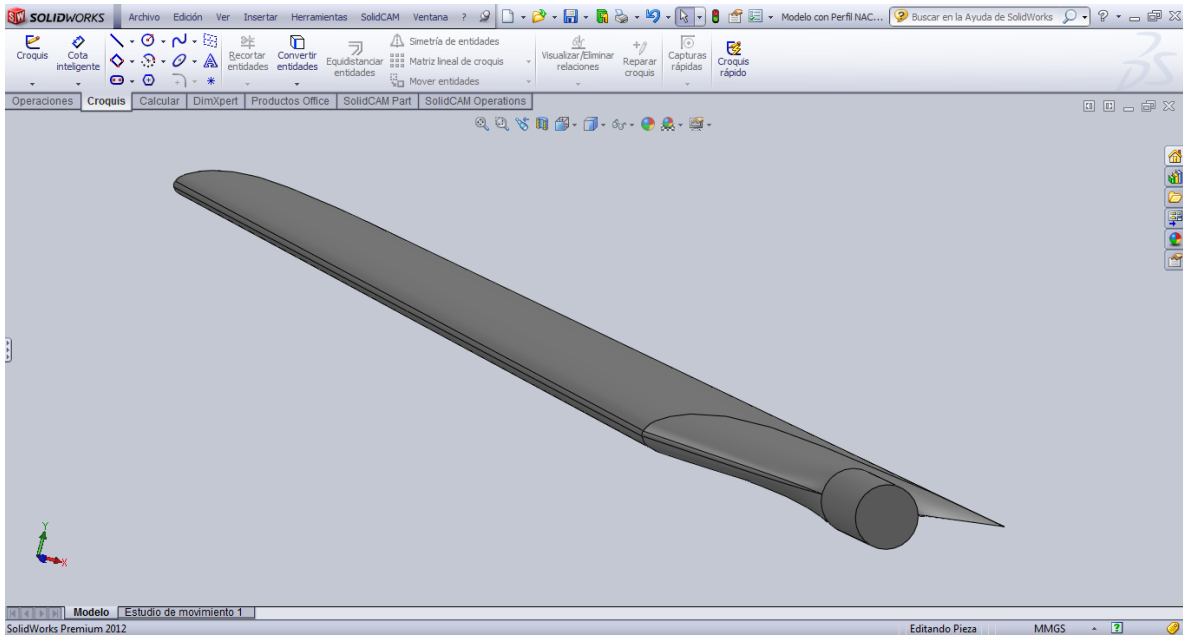


Figura 107. Modelo final en CAD.

### 3. SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN DEL MODELO CON EL AIRE (CFD-Flow Simulation)

Para simular el modelo de la pala interactuando con las fuerzas resultantes del choque de las corrientes de aire con el mismo, se utilizó software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), en este caso **Flow Simulation** que es una herramienta de **SolidWorks**.

Una vez que se tiene el archivo del modelo de la pala, abierto en **SolidWorks**, se hace clic en la pestaña de **herramientas** y luego en **complementos**(**Figura 108.**).

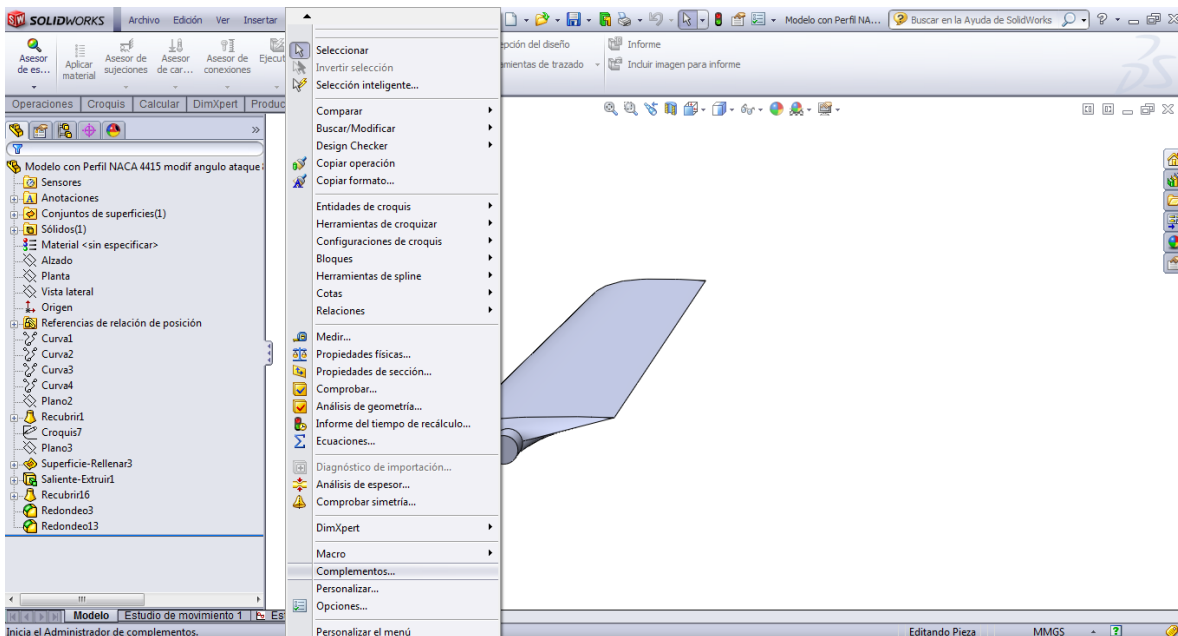


Figura 108. Activando el complemento Flow Simulation

Lo siguiente es activar el complemento **Flow Simulation**, haciendo clic en la parte izquierda de este título, verificando que el visto quede marcado (**Figura 109.**).

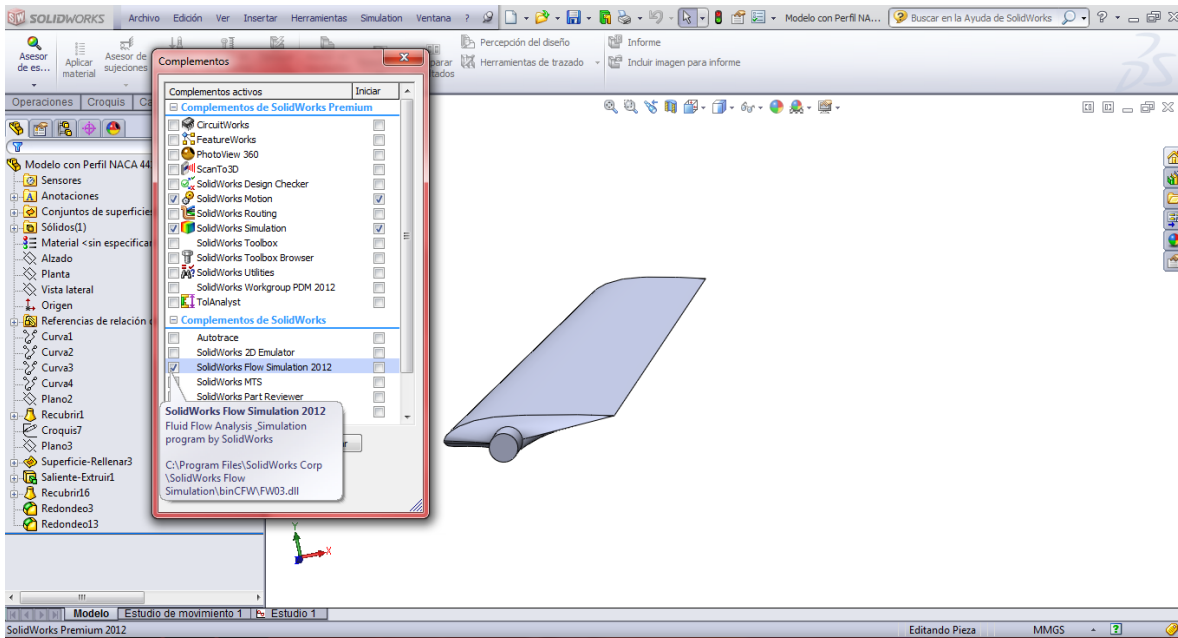


Figura 109. Activando el complemento Flow Simulation

Automáticamente la pestaña **Flow Simulation** aparecerá (Figura 110.).

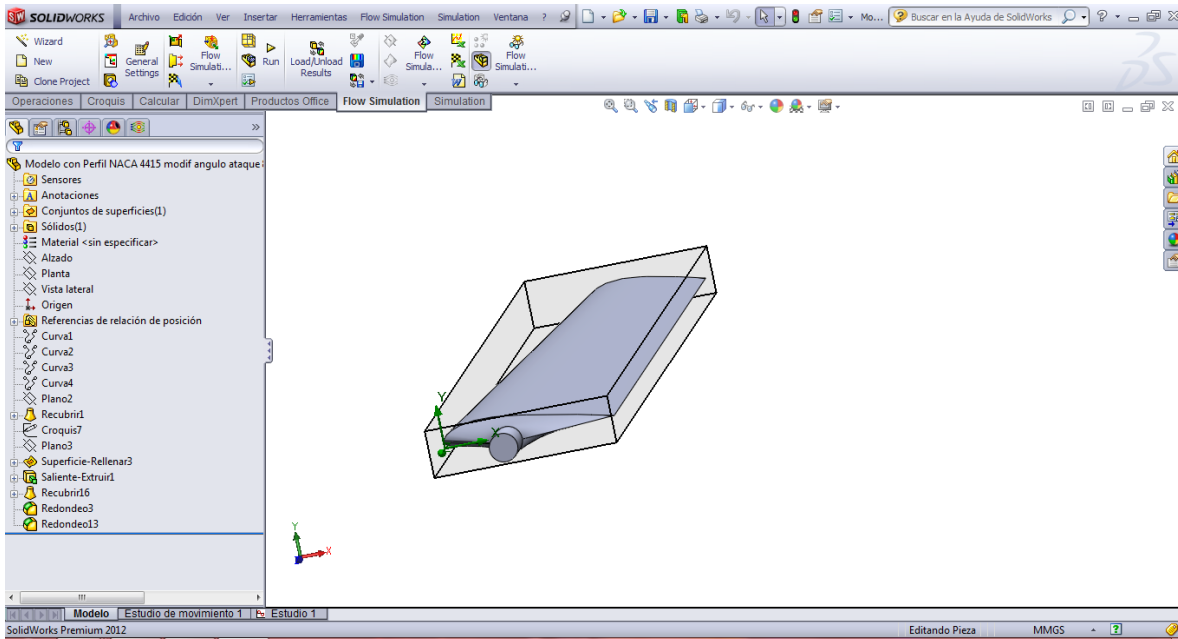


Figura 110. Activando el complemento Flow Simulation

Para realizar un análisis de Dinámica de Fluidos Computacional, y definir los parámetros necesarios para el mismo, se hace clic en **Wizard** (en la parte superior izquierda de la pestaña **Flow Simulation**) (Figura 111.).

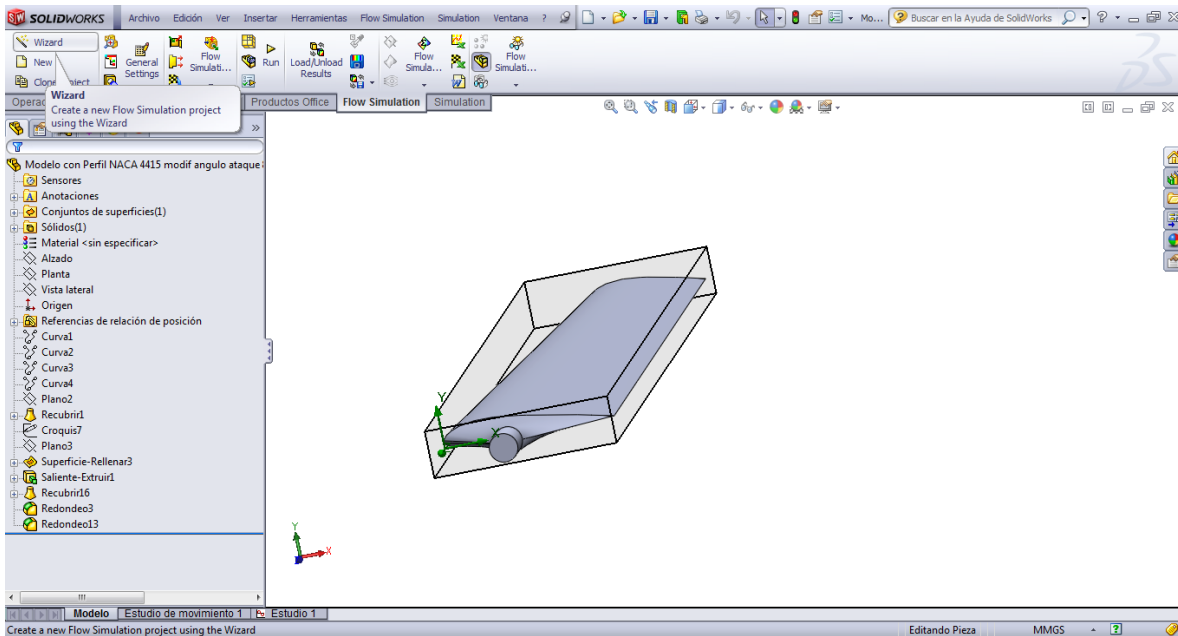


Figura 111. Definición de los parámetros de análisis

Aparecerá una ventana con el título de **Wizard**. La primera parte está relacionada con la configuración del proyecto (Configuration Project). Aquí se hace clic en **Create New** (Crear Nuevo), y se nombra a dicho proyecto en curso. Concluido esto se hace clic en **Next** (Siguiete) (**Figura 112.**).

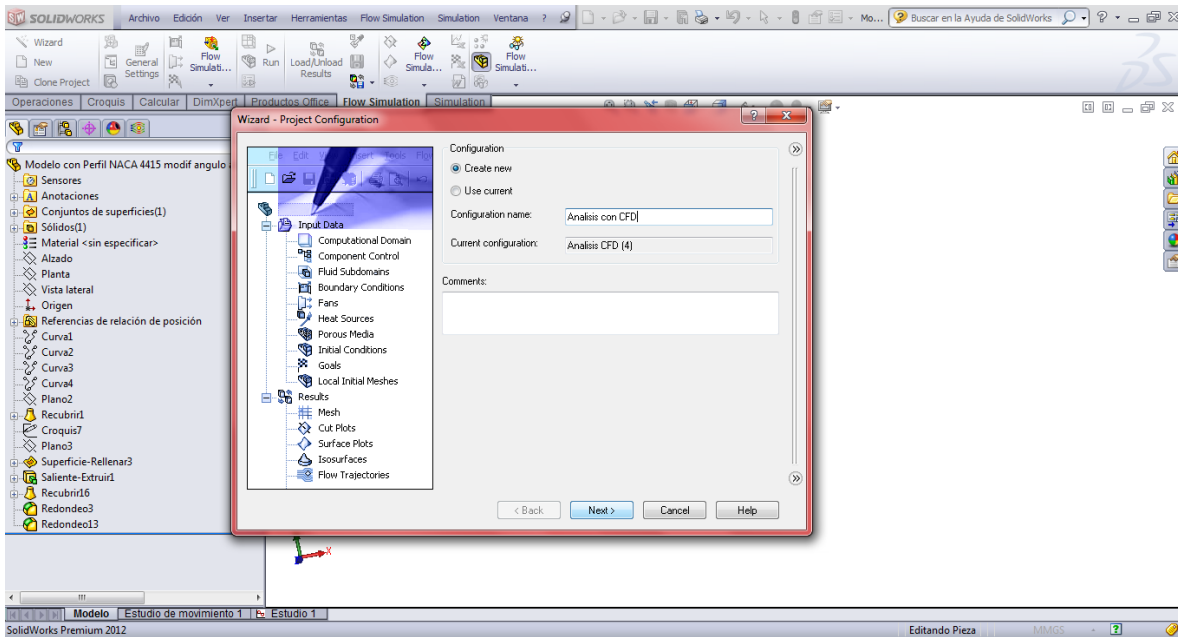


Figura 112. Configuración del proyecto



La siguiente parte que permite configurar el **Wizard** es el sistema de unidades, por convención se utilizará el sistema internacional (SI). Al finalizar se hace clic en **Next** (Figura 113.).

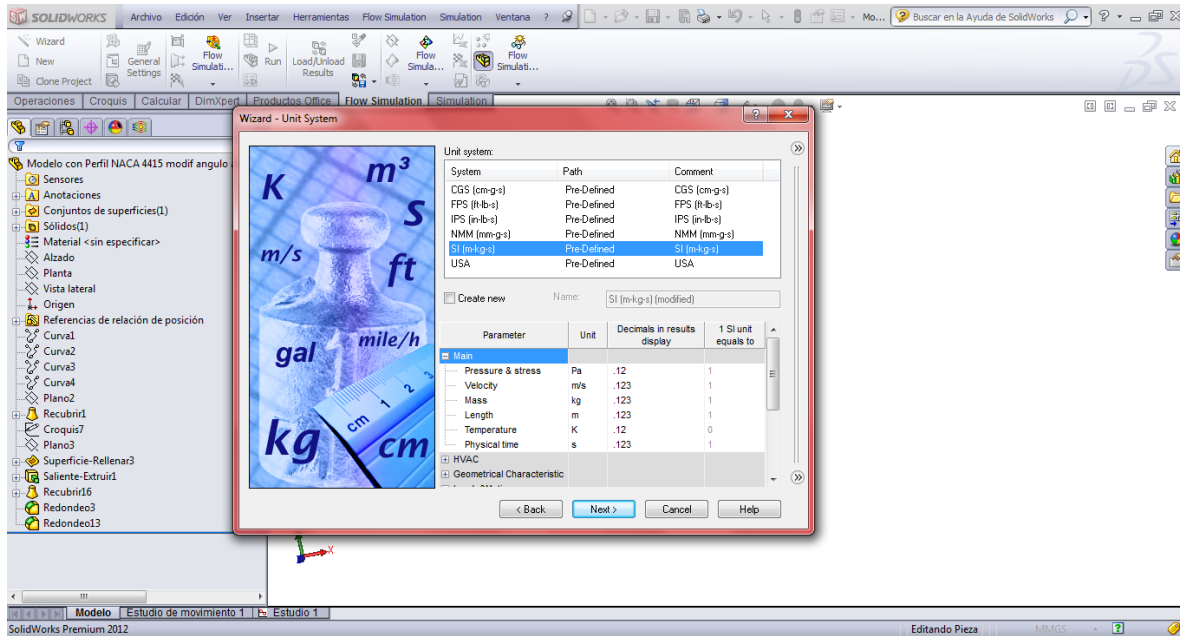


Figura 113. Sistema de Unidades

Lo siguiente es determinar el tipo de análisis (**Analysis type**), en este caso es un análisis externo, ya que el flujo de aire pasa alrededor del modelo, se hace clic en **Exclude cavities without flow conditions** (Excluir cavidades sin condiciones de flujo) y **Exclude internal space** (Excluir espacio interno), esto para que el análisis sea más rápido (Figura 114.).

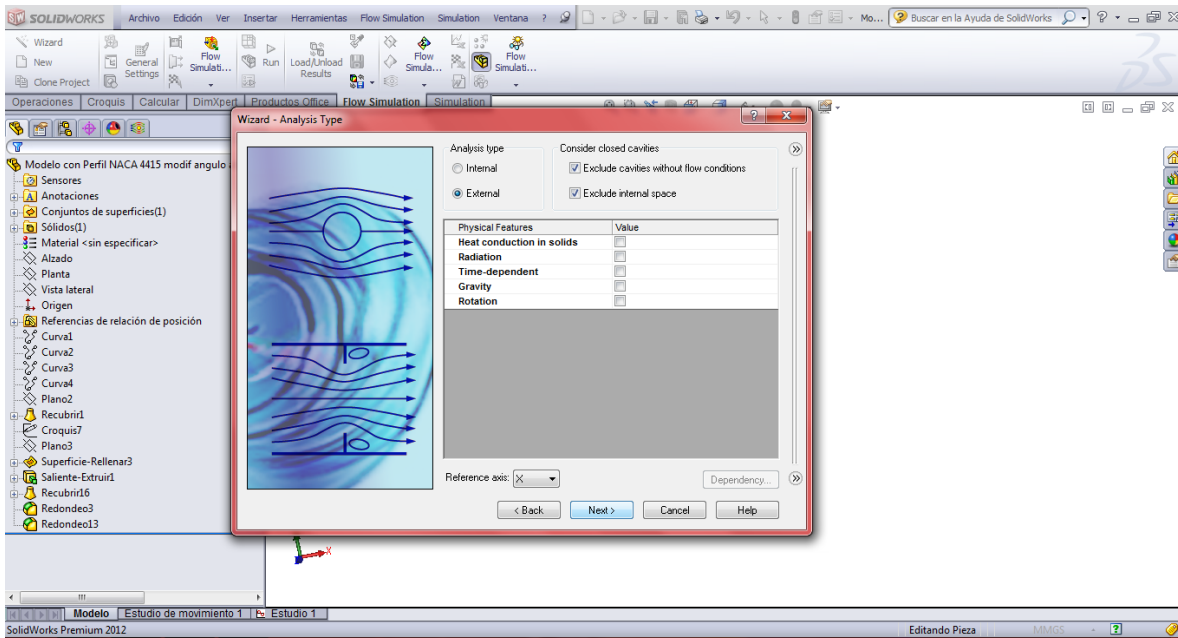


Figura 114. Tipo de Análisis

Seguidamente se debe seleccionar el tipo de fluido. En este caso se hace clic en Gases (Figura 115.).

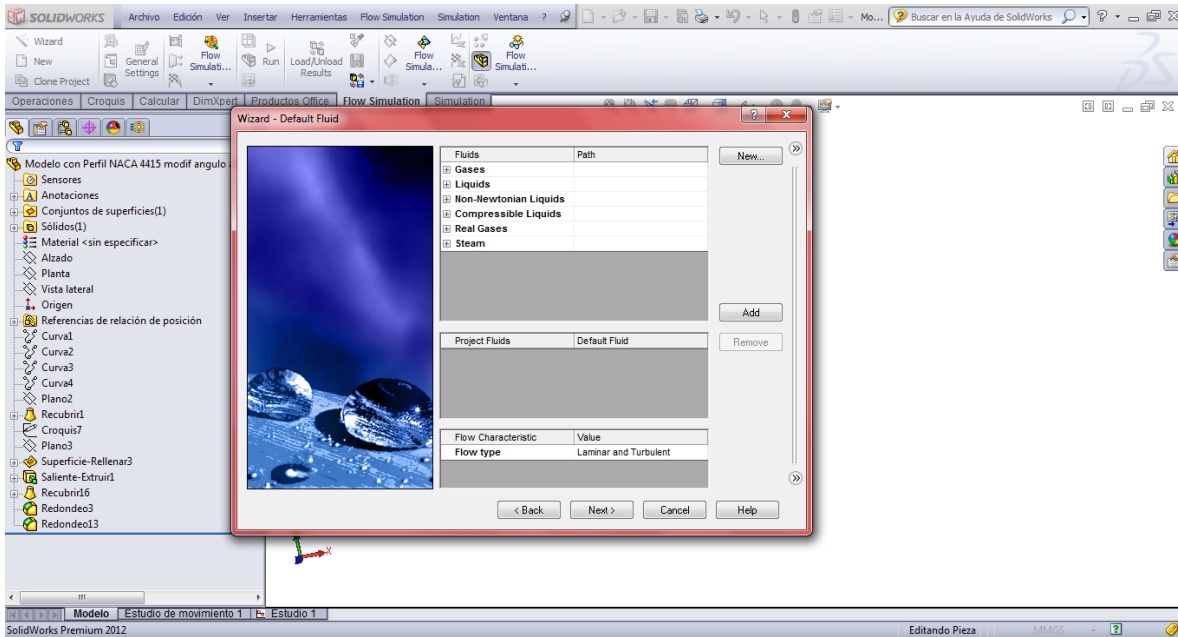


Figura 115. Tipo de fluido

Luego se selecciona **Aire**, y se hace clic en **Add** (Añadir) (Figura 116.).

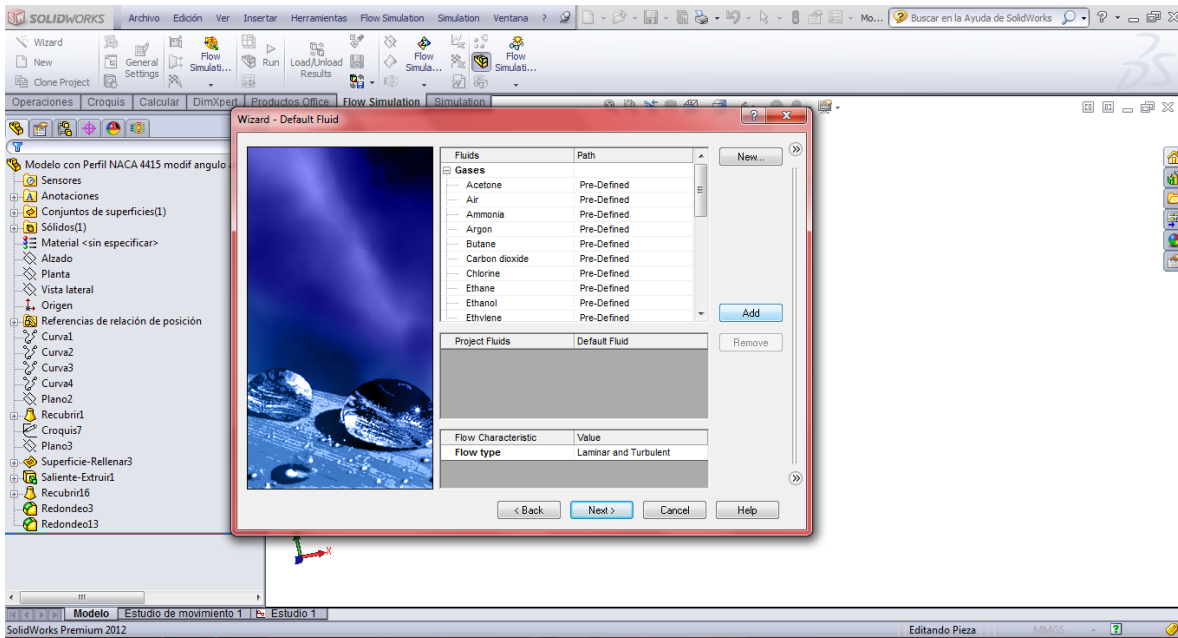


Figura 116. Tipo de fluido

Luego en condiciones de barrera (**Wall Conditions**) se dejará los ajustes por defecto, así que se hace clic en **Next** (Figura 117).

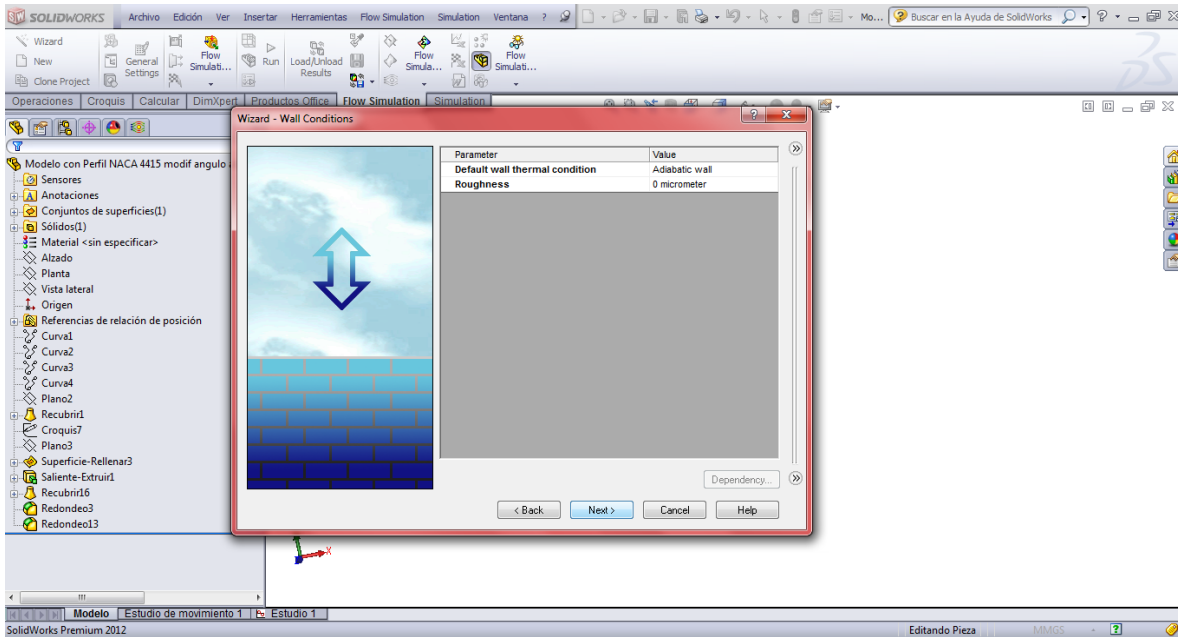


Figura 117. Condiciones de barrera

Después se continúa configurando las condiciones Iniciales y de ambiente, es decir la presión, la temperatura y la velocidad del viento (Figura 118).

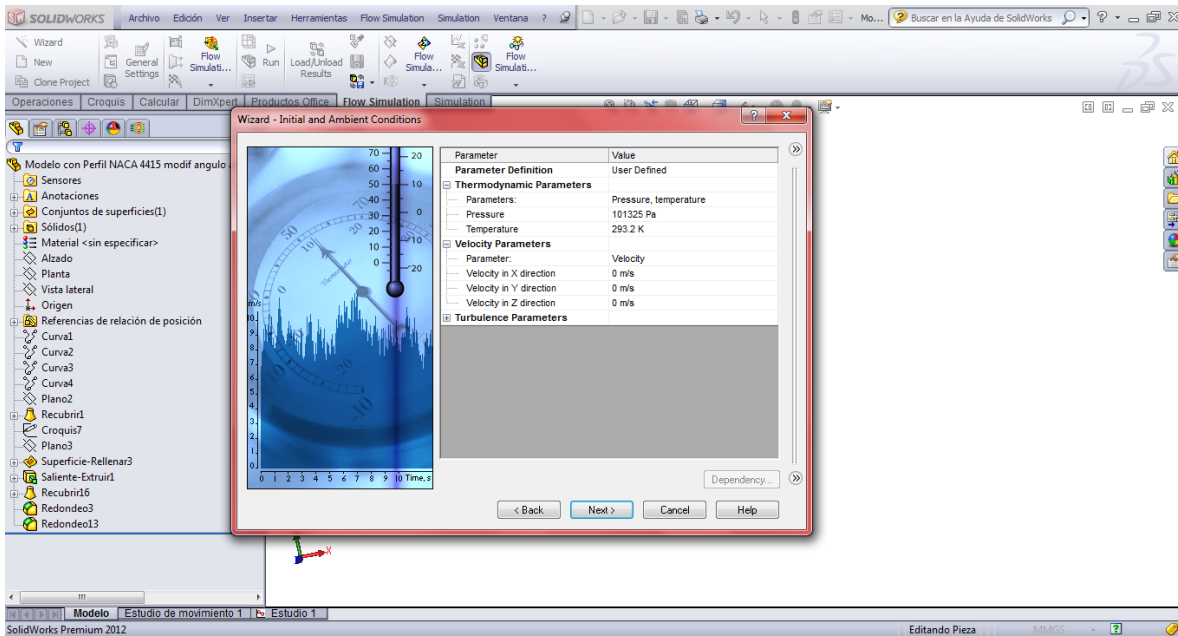


Figura 118. Condiciones iniciales y de ambiente

En este caso se efectuó el análisis tomando en cuenta una velocidad del viento en el eje X de 12 m/s (**Figura 119**).

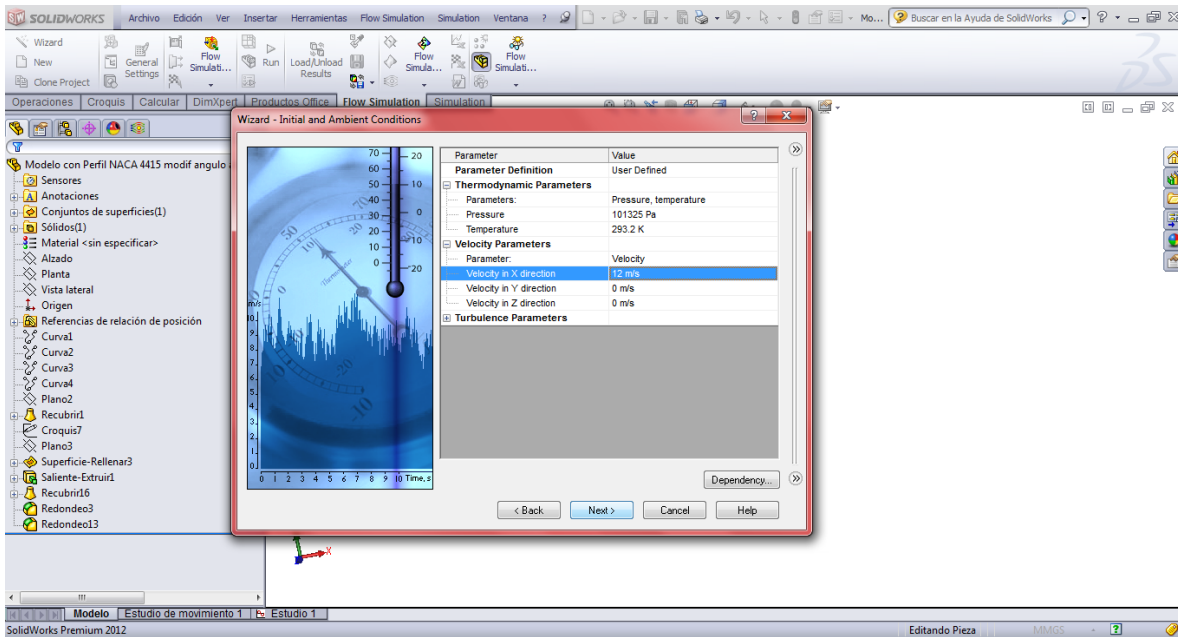


Figura 119. Condiciones iniciales y de ambiente

La parte final corresponde a la resolución de resultados y geometría, en este caso no se modificaron los ajustes por defecto, para que el número de iteraciones sea el estándar (**Figura 120**).

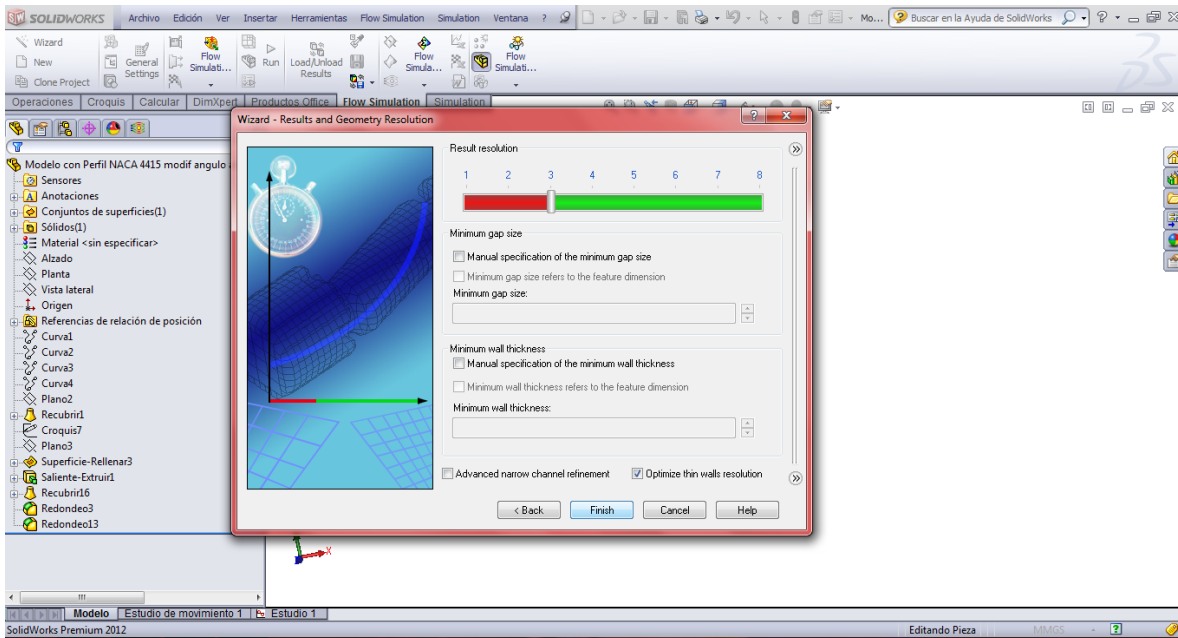


Figura 120. Resolución de resultados y de geometría

Al finalizar la configuración de parámetros en el **Wizard**, aparecerá un prisma envolviendo al modelo, este representa el dominio computacional, o el espacio en el que se realizara el análisis de comportamiento del fluido (**Figura 121.**).

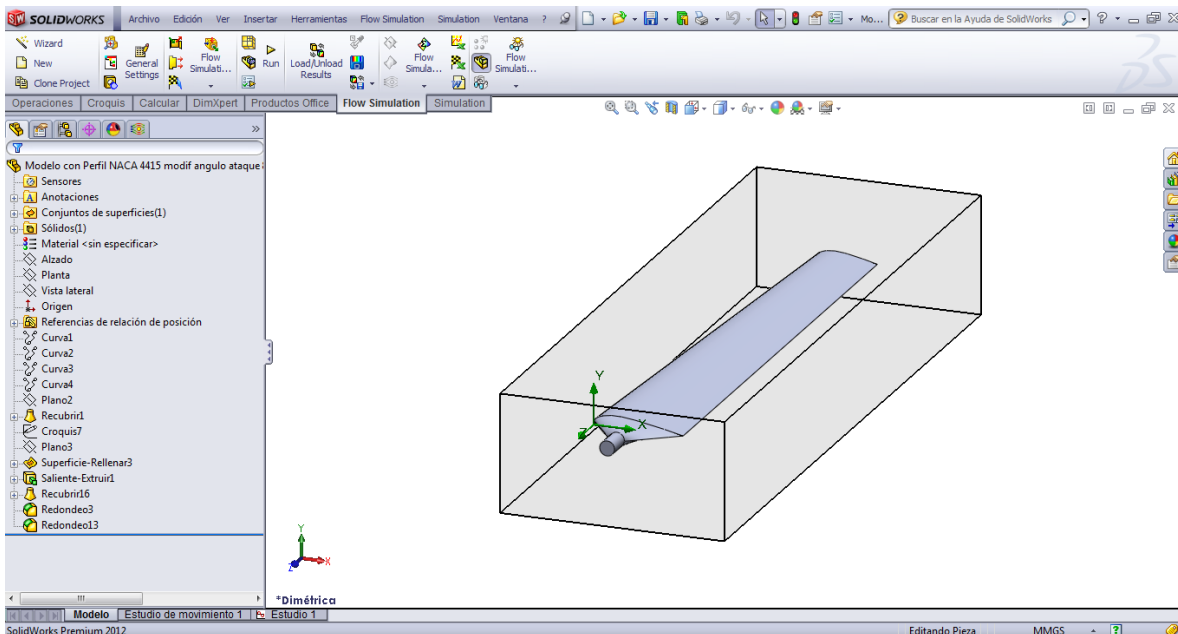


Figura 121. Dominio computacional

Para modificar las dimensiones de este espacio, se hace clic en la pestaña de **Flow Simulation analysis tree** (Árbol de análisis del **Flow Simulation**) (**Figura 122.**).

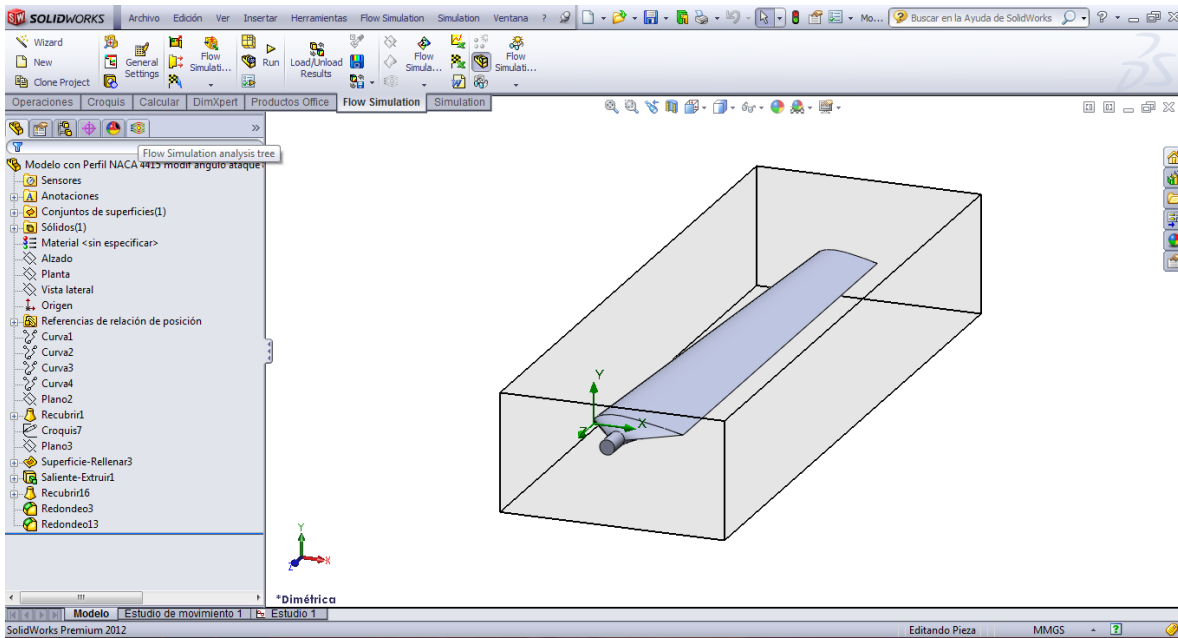


Figura 122. Dominio computacional

Se hace clic derecho en **Computational Domain** (Dominio computacional), y luego en **Edit Definition** (Editar definición) (Figura 123.).

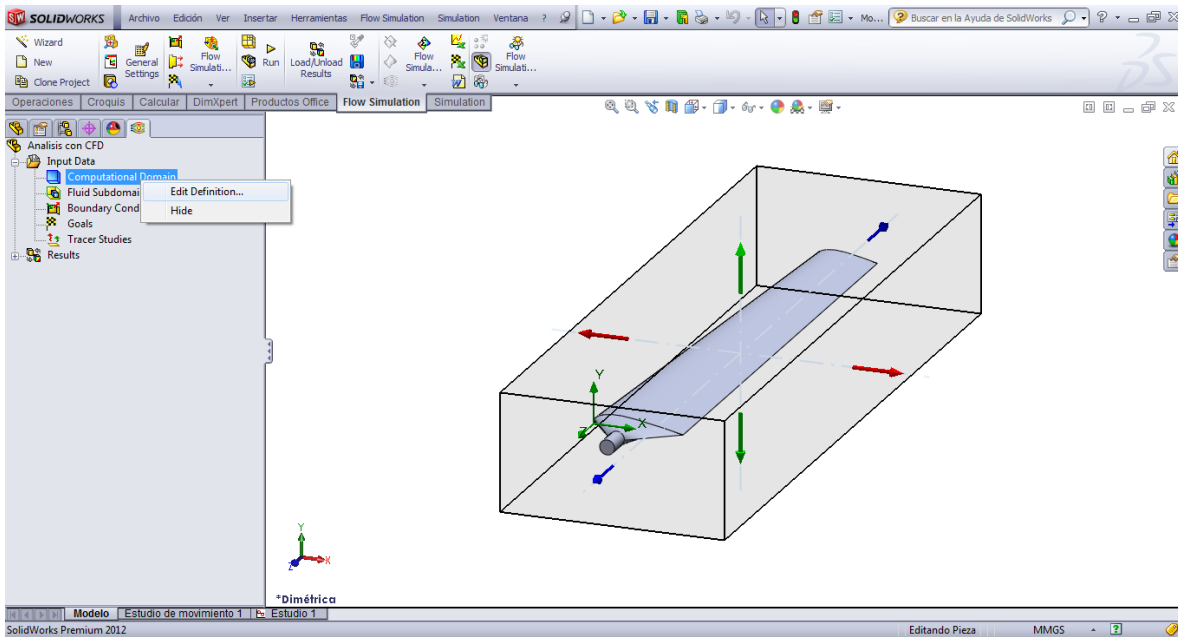


Figura 123. Dominio computacional

En ese punto se podrá modificar las dimensiones del espacio en el cuál se desarrollara el análisis de flujo (Figura 124.).

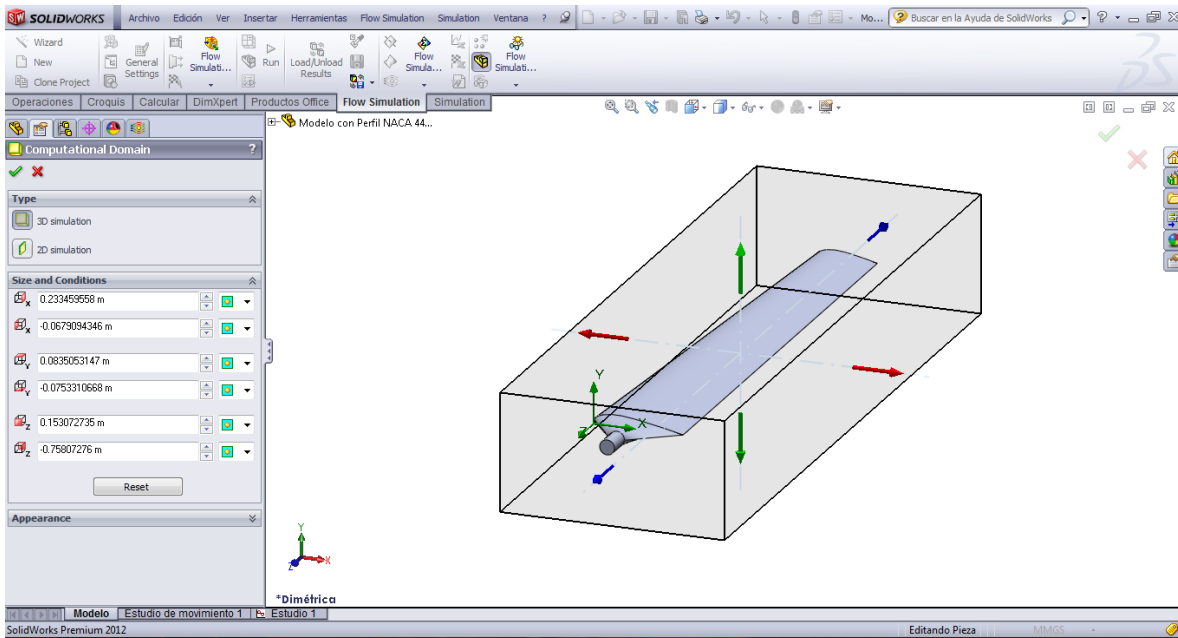


Figura 124. Dominio computacional

Una vez finalizado este paso, se hace clic en **Aceptar** (Figura 125.).

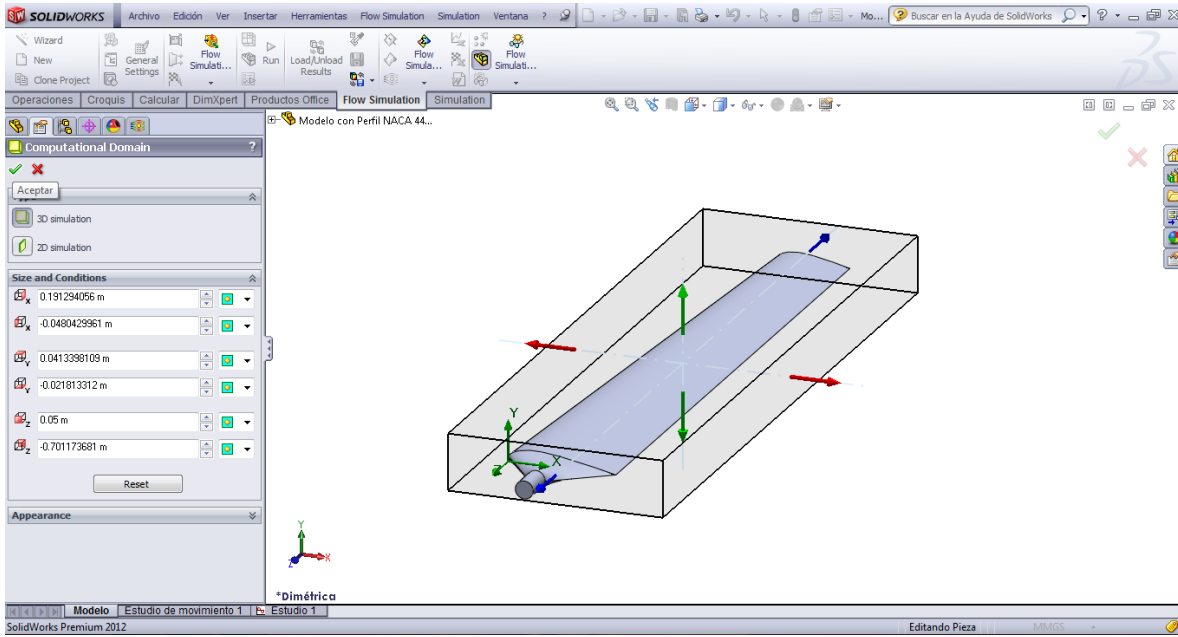


Figura 125. Dominio computacional

Lo siguiente es hacer clic en **Run**, para ejecutar el análisis (Figura 126.).



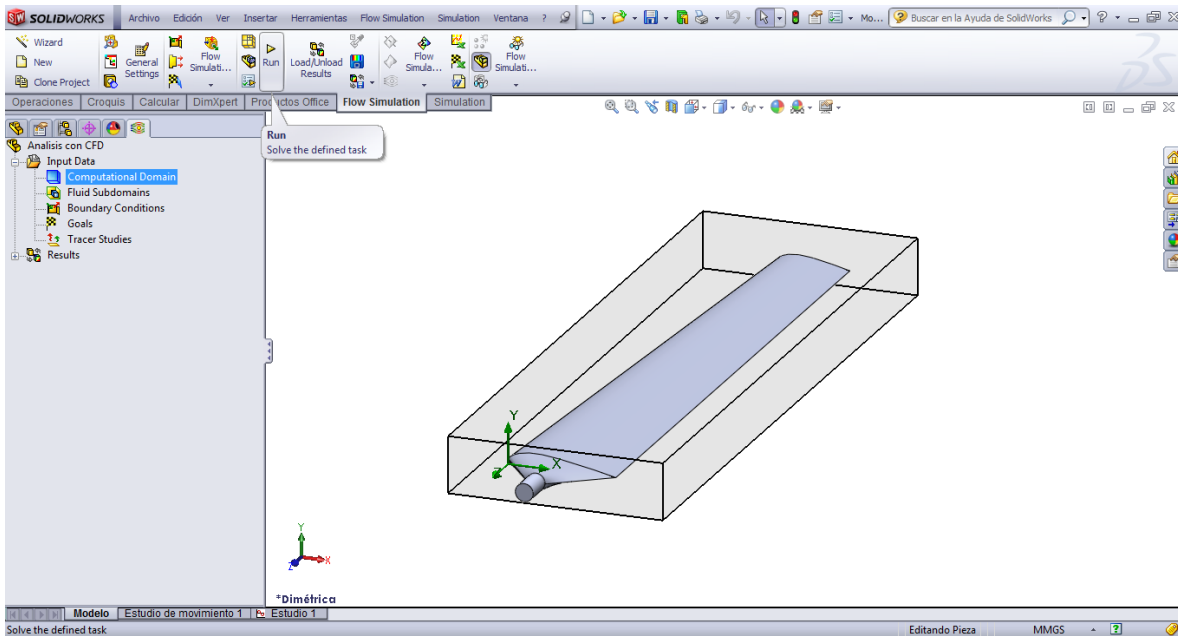


Figura 126. Ejecución del análisis CFD

Aparecerá una ventana en la cual no se modifican los ajustes por defecto y se hace clic en **Run** (Figura 127.).

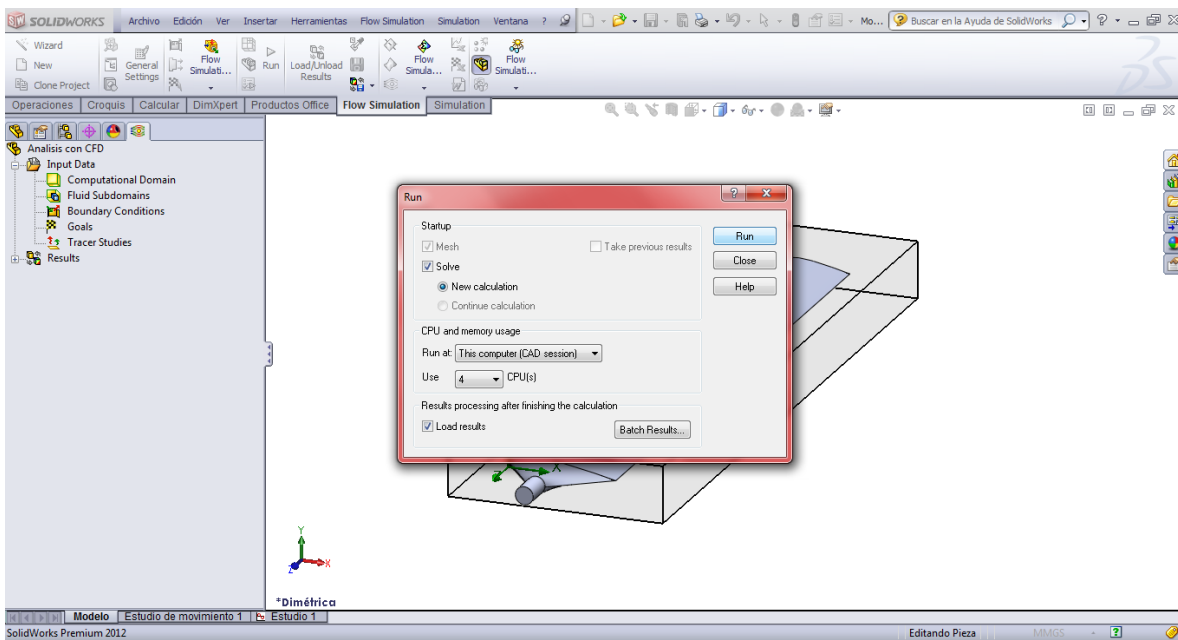


Figura 127. Ejecución del análisis CFD

Al instante se mostrará una ventana en la cual se generará una malla para efectuar el análisis (Figura 128.).



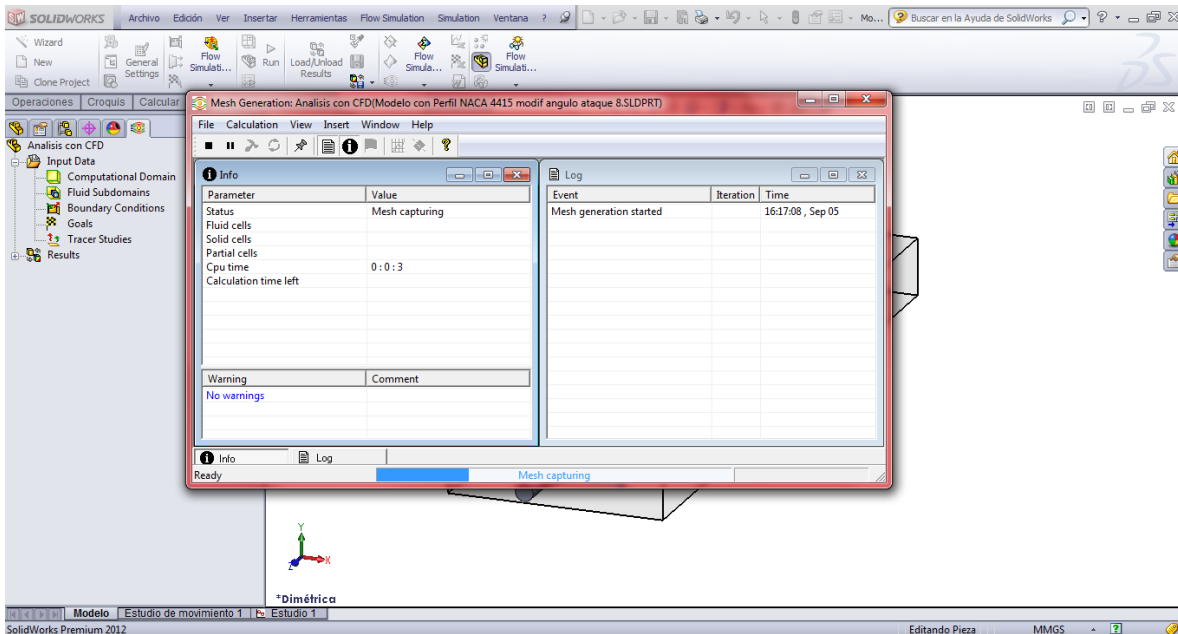


Figura 128. Ejecución del análisis CFD

Seguidamente iniciará el proceso de cálculo en el **Solver** (Solucionador), y se realizarán las iteraciones necesarias para mostrar los resultados del análisis.

Al finalizar el proceso de cálculo, en la parte inferior de la ventana del Solver, aparecerá el mensaje **Solver finished** (Figura 129.).

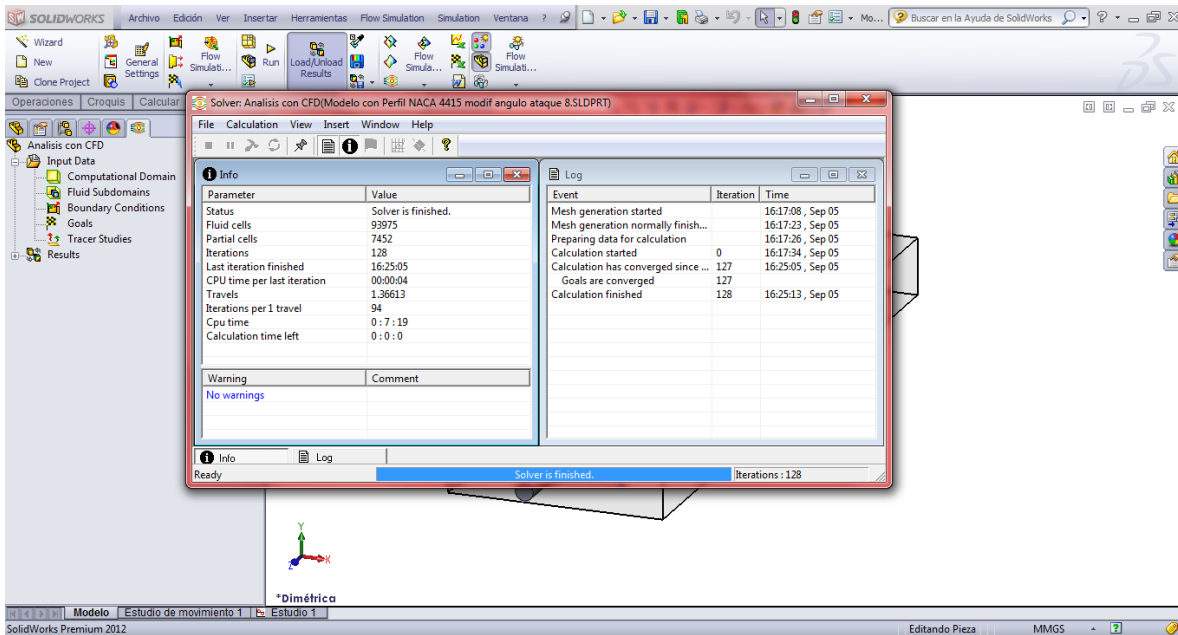


Figura 129. Ejecución del análisis CFD

En este punto se deben seleccionar las superficies en las cuales se desea visualizar el recorrido de las trayectorias de flujo, para esto se hace clic en **Flow Trajectories** (Trayectorias de flujo) (**Figura 130.**).

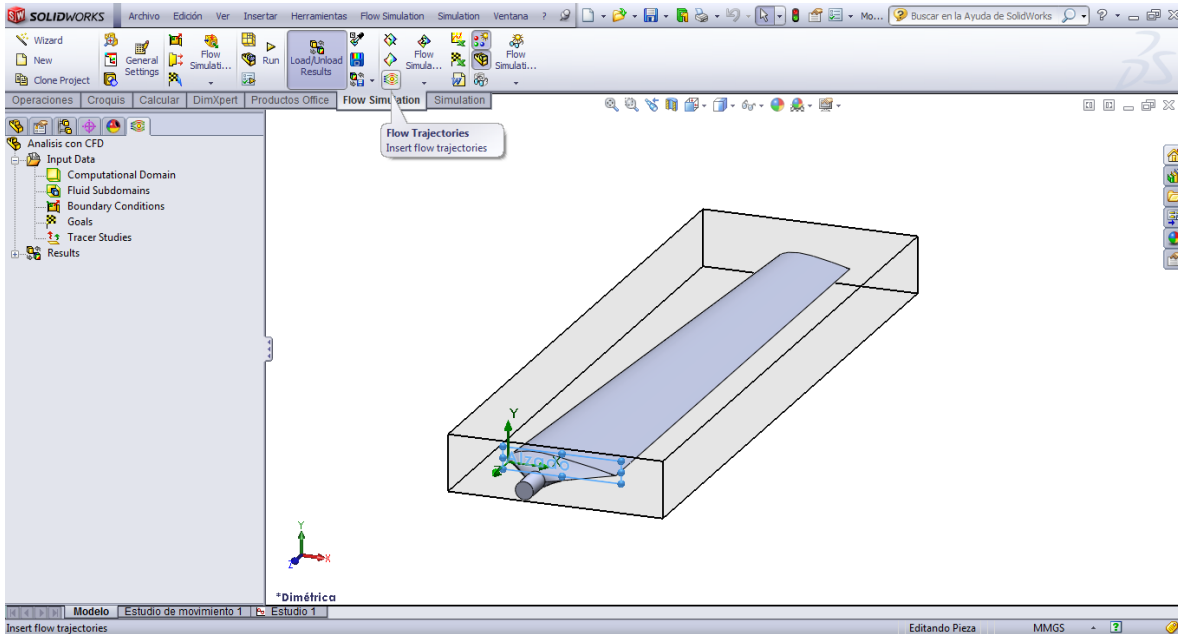


Figura 130. Trayectorias de flujo

Aparecerá una ventana en la cual se debe determinar las superficies en contacto con el fluido que se desea visualizar (**Figura 131.**).

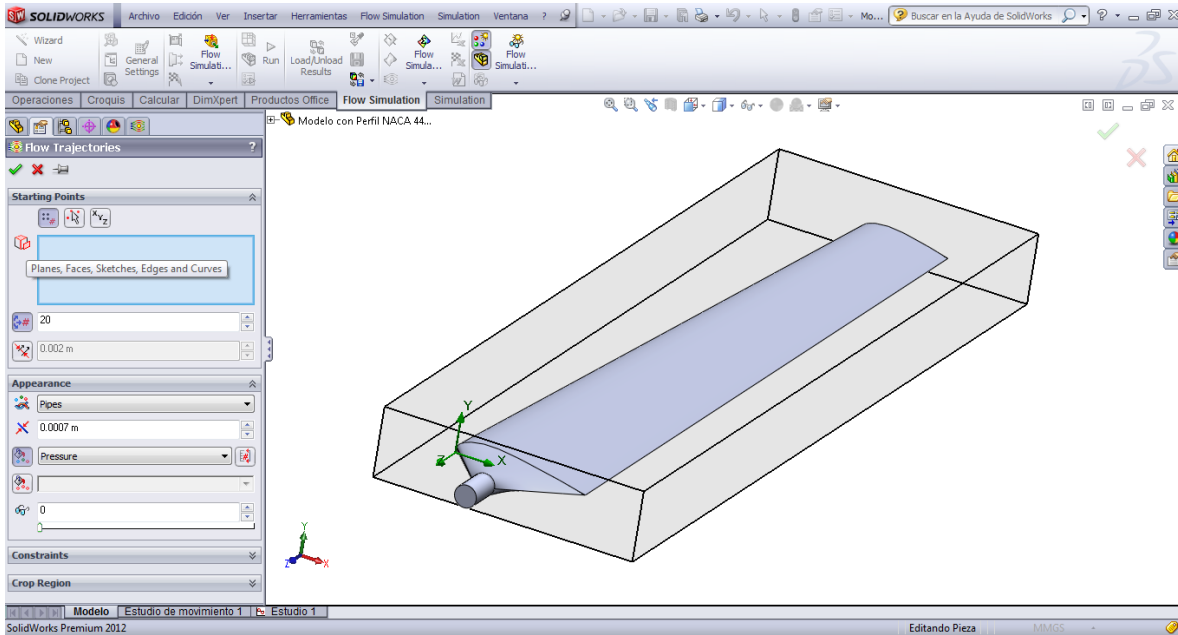


Figura 131. Trayectorias de flujo

Además de las superficies, se puede modificar el número de puntos o trayectorias a visualizar (**Figura 132.**).

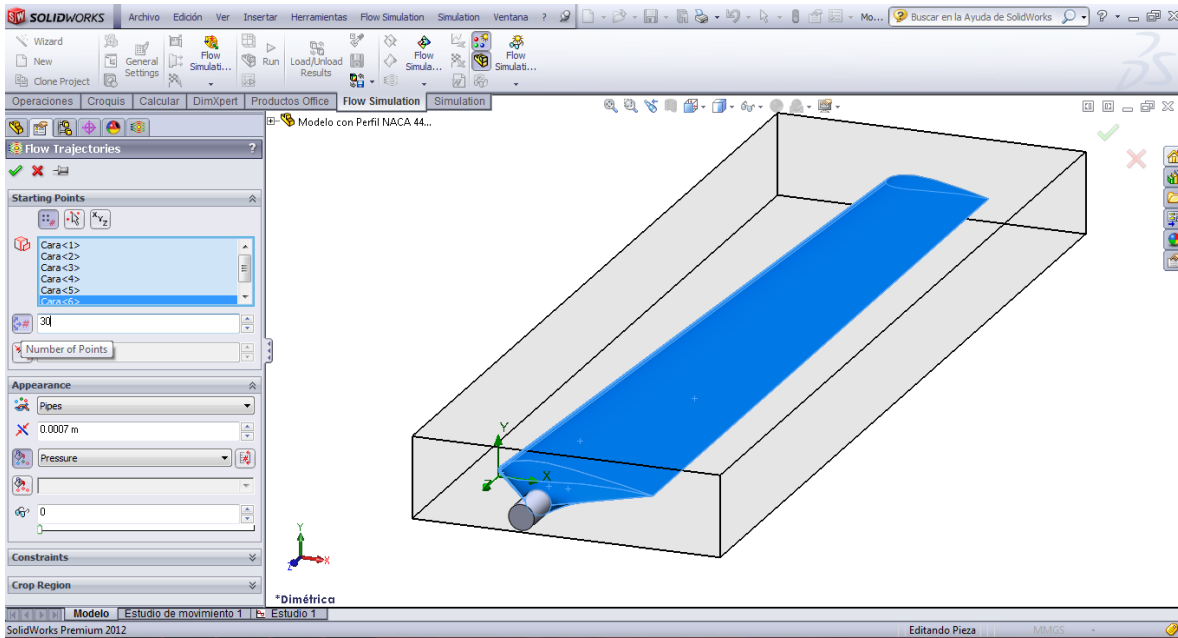


Figura 132. Trayectorias de flujo

Se puede seleccionar el tipo de trayectorias a visualizar, estas pueden ser por tuberías, líneas, líneas con flechas, etc. (**Figura 133.**).

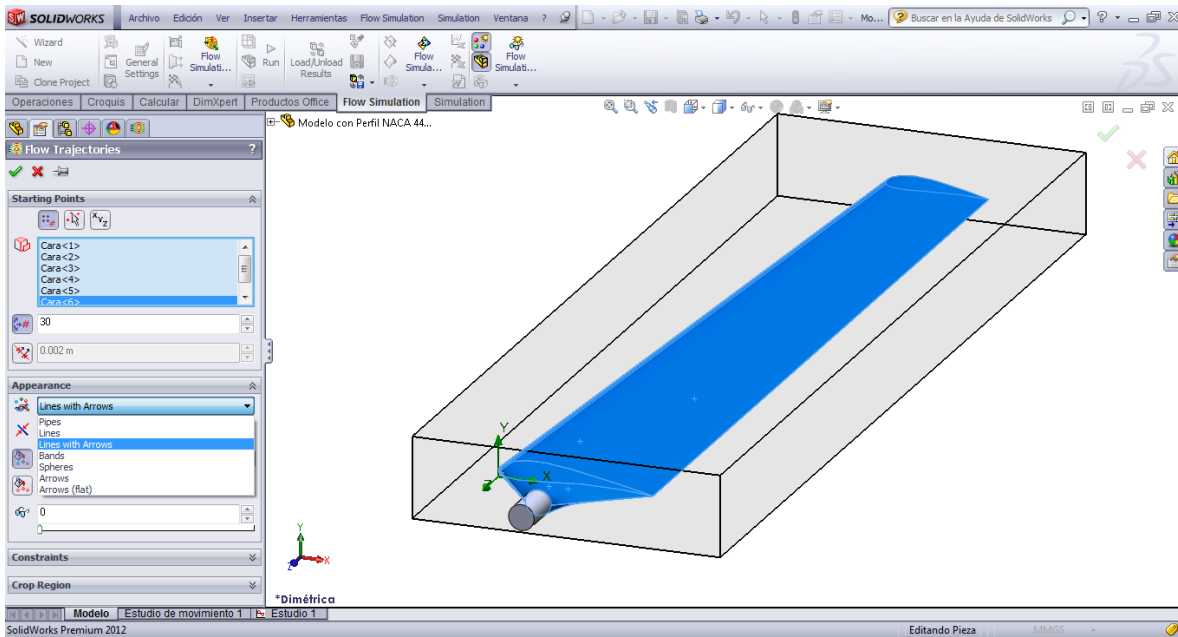


Figura 133. Trayectorias de flujo

Una vez finalizada la determinación de estos parámetros se hace clic en aceptar (**Figura 134.**).

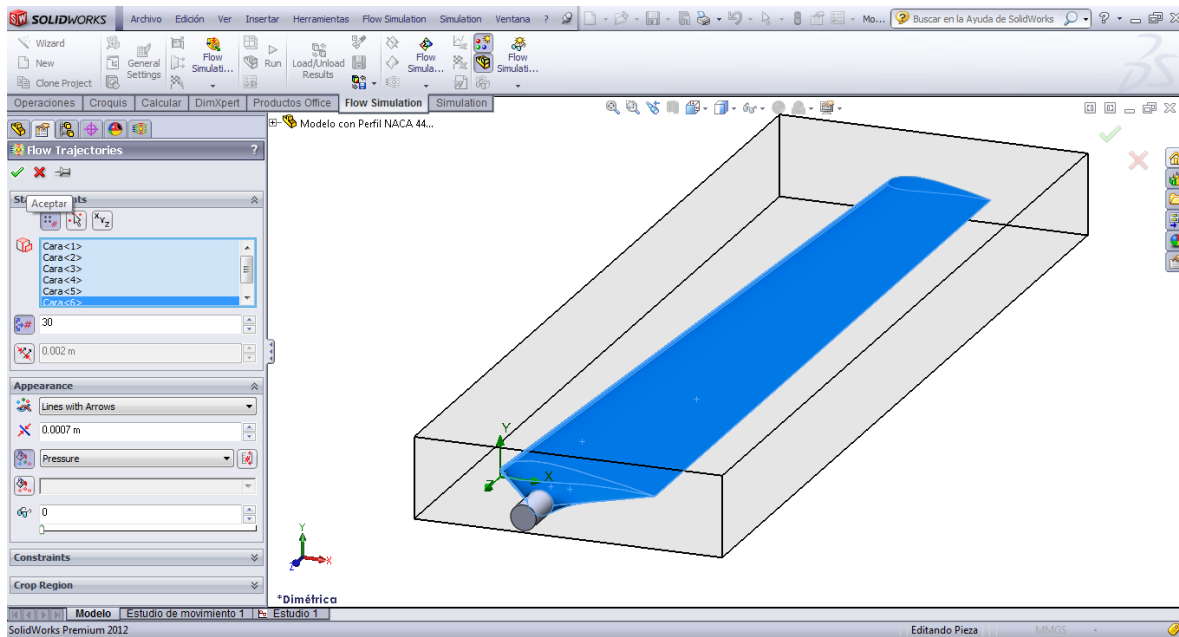


Figura 134. Trayectorias de flujo

Al instante se mostrarán las trayectorias del fluido interactuando con el modelo (**Figura 135.**).

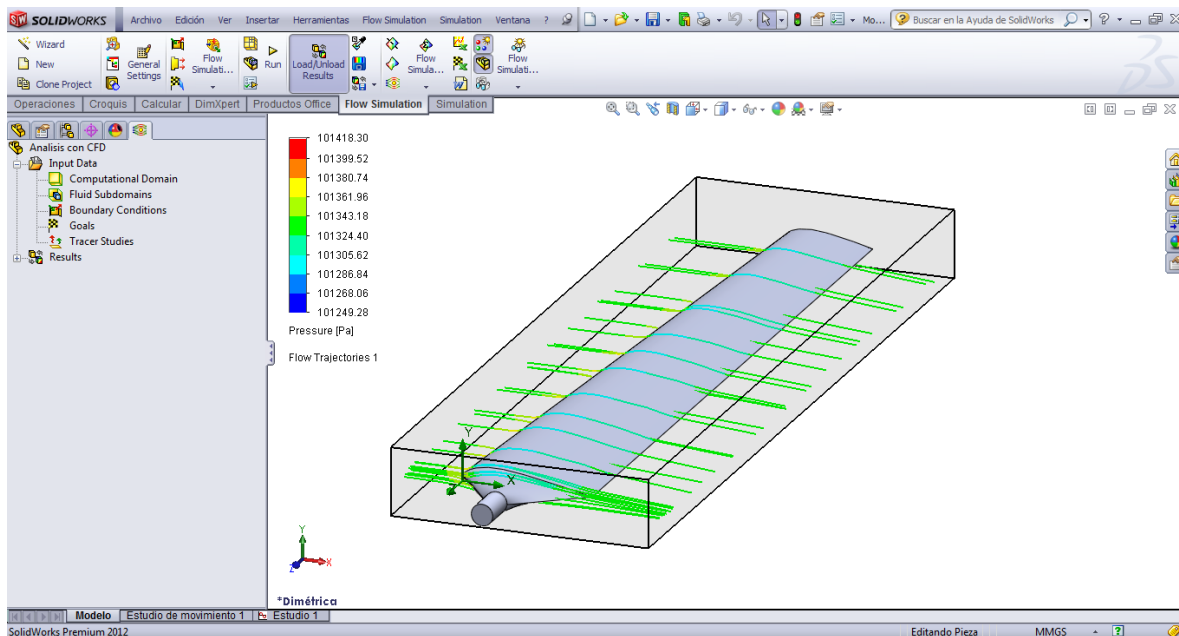


Figura 135. Trayectorias de flujo

También se puede animar el movimiento del flujo de aire, para esto, en **Flow Trajectories**, en la parte de **Results** (Resultados), se hace clic derecho y luego en **Animation**(Animación) (Figura 136.).

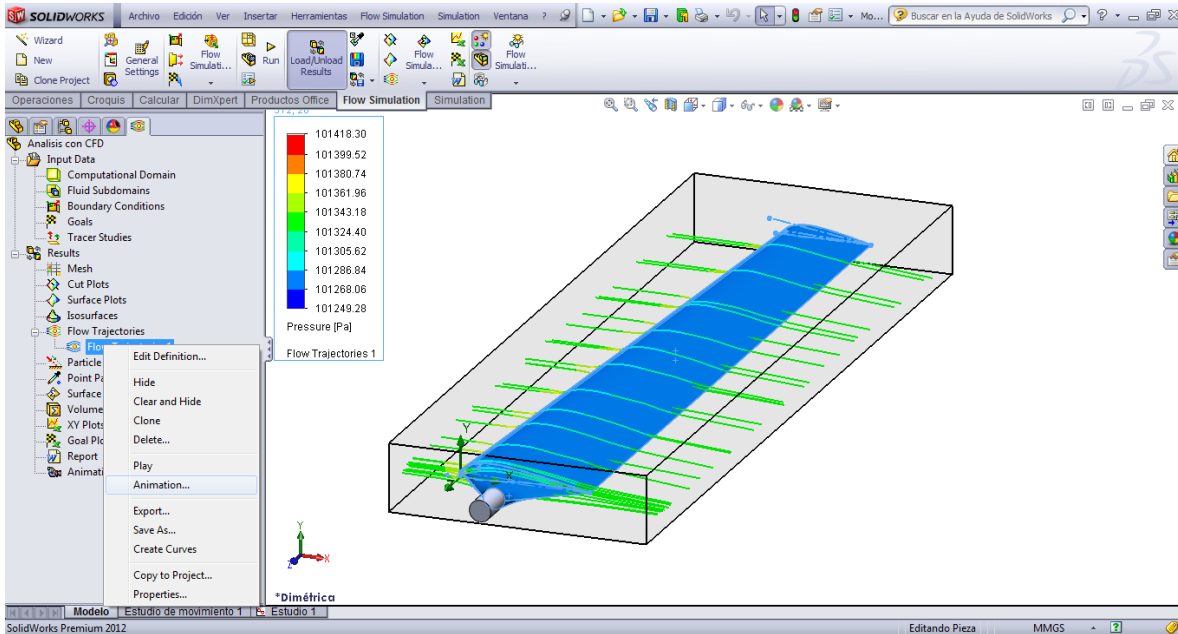


Figura 136. Animación Trayectorias de flujo

En la parte inferior aparecerá una barra de herramientas de Animación, se hace clic en **Play** (Reproducir) (Figura 137.).

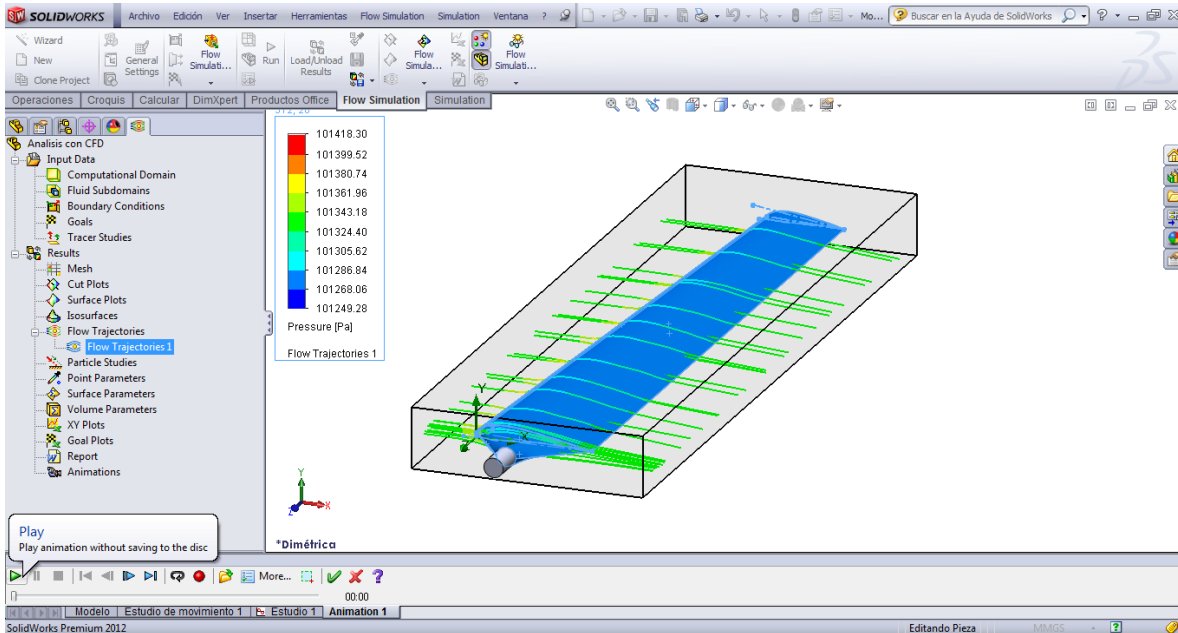


Figura 137. Animación Trayectorias de flujo

Se podrá visualizar el comportamiento de las trayectorias del flujo en movimiento (**Figura 138.**) (**Figura 139.**).

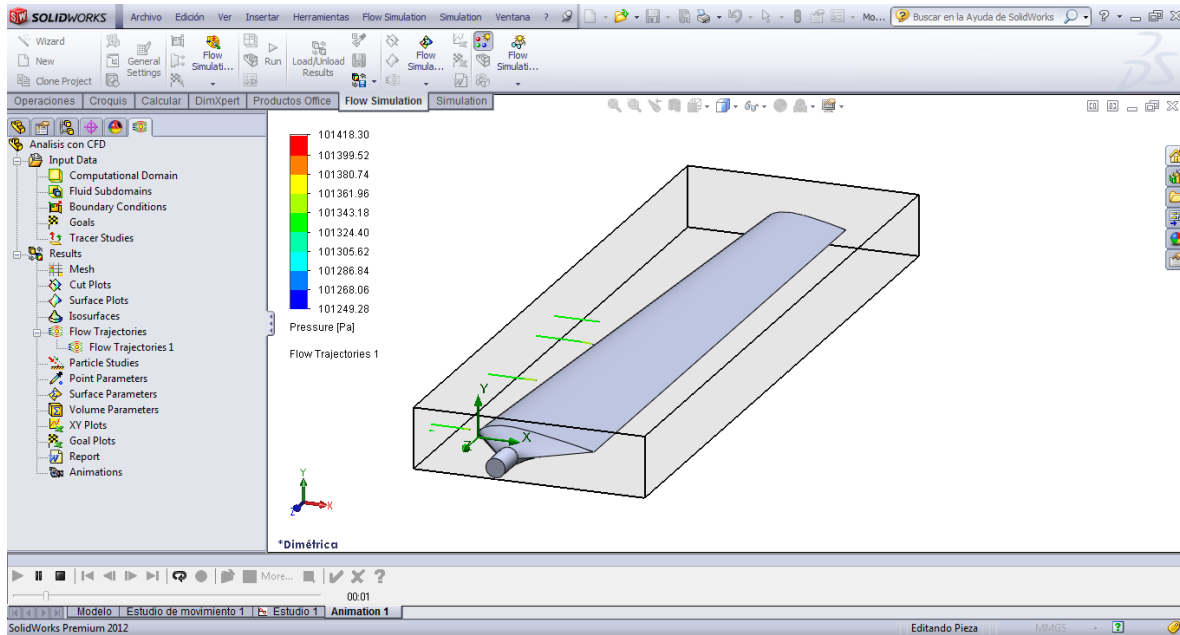


Figura 138. Animación Trayectorias de flujo

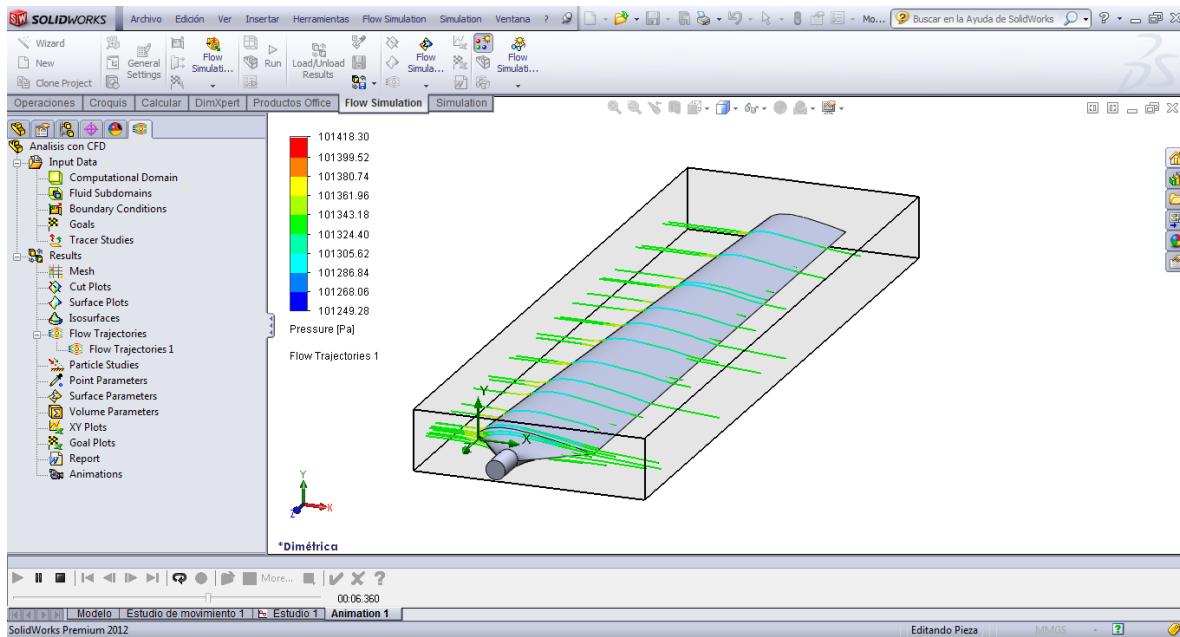


Figura 139. Animación Trayectorias de flujo

Lo siguiente es generar el archivo de Reporte de resultados, para esto se hace clic en el icono con la **W** (en referencia a Microsoft Office Word) (**Figura 140.**).

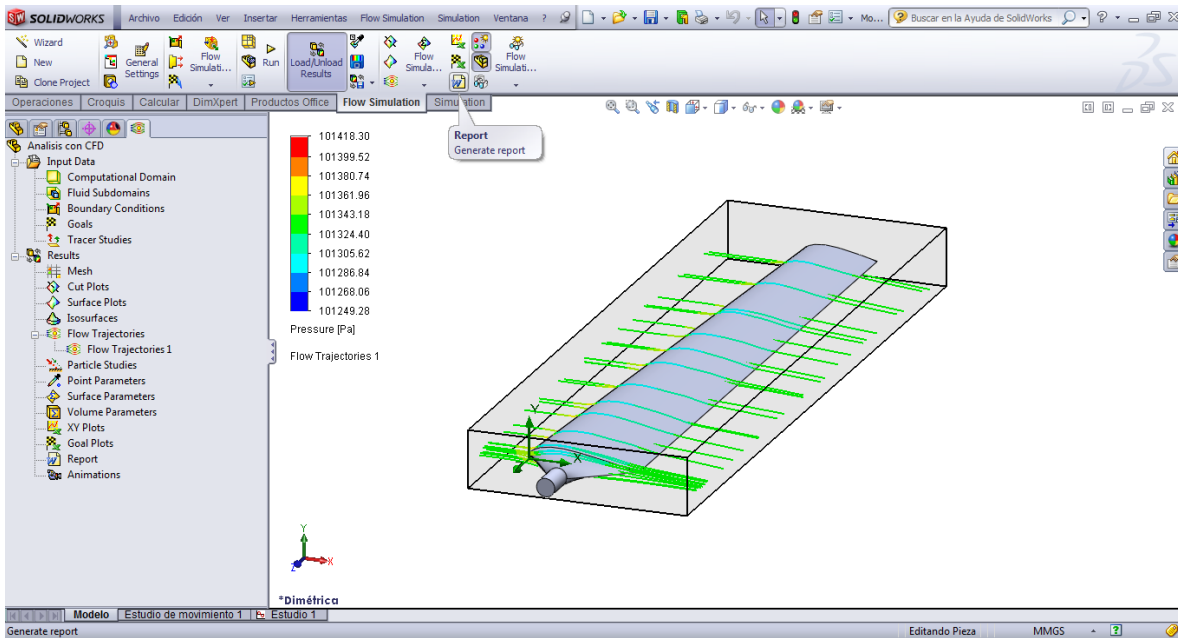


Figura 140. Generación de reporte de resultados

Aparecerá una ventana con el título de **Report** (Reporte), se hace clic en **New Document** (Figura 141.).

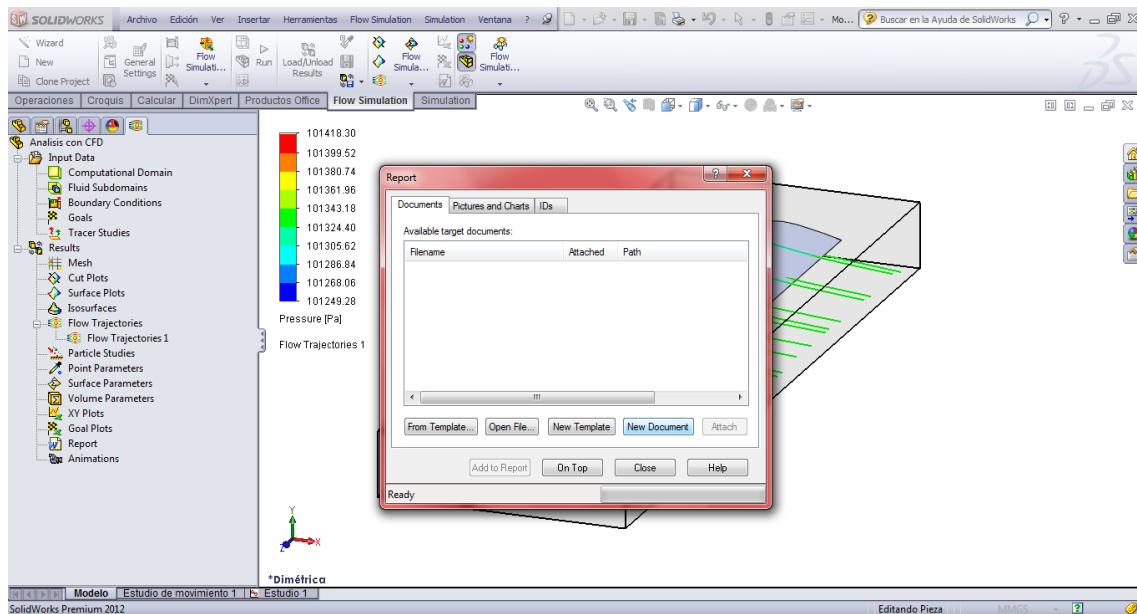


Figura 141. Generación de reporte de resultados

En la pestaña de **Documents**, en **Available target documents** (Documentos objetivo disponibles) se creará automáticamente un archivo de Word, y en la parte de **Attached** (Adjunto) por defecto se mostrará **Yes**, esto significa que en ese documento se adjuntará toda la información del análisis efectuado (Figura 142.).

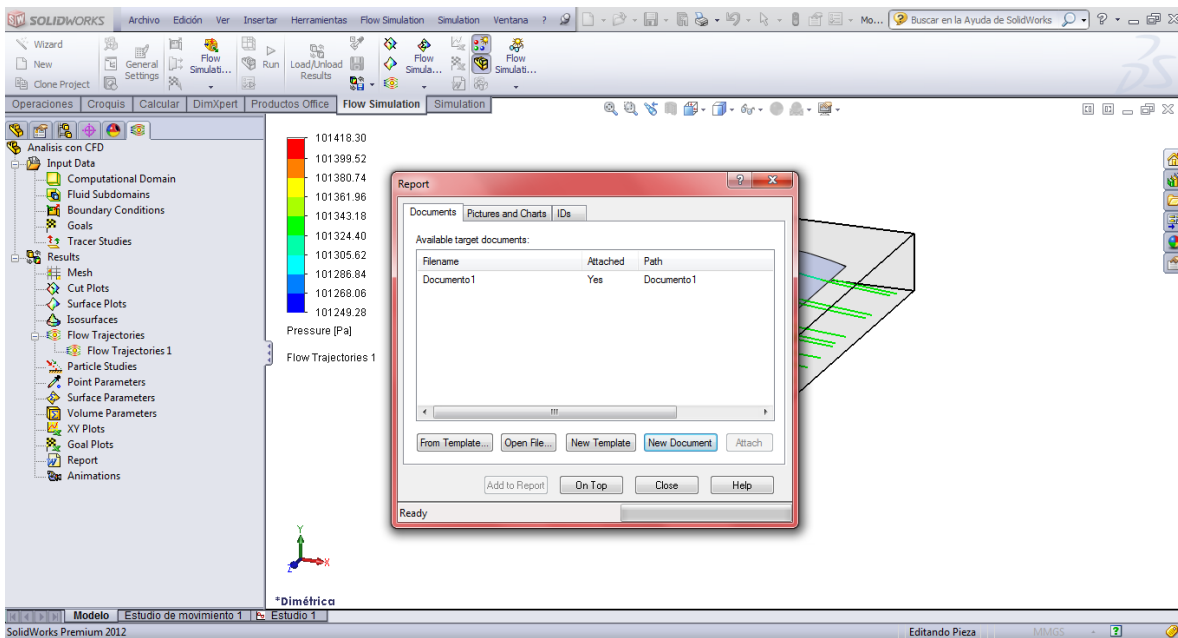


Figura 142. Generación de reporte de resultados

Se hace clic en **Pictures and Charts** (Tablas y Figuras), y se deja por defecto las opciones que se muestran en esta pestaña (Figura 143).

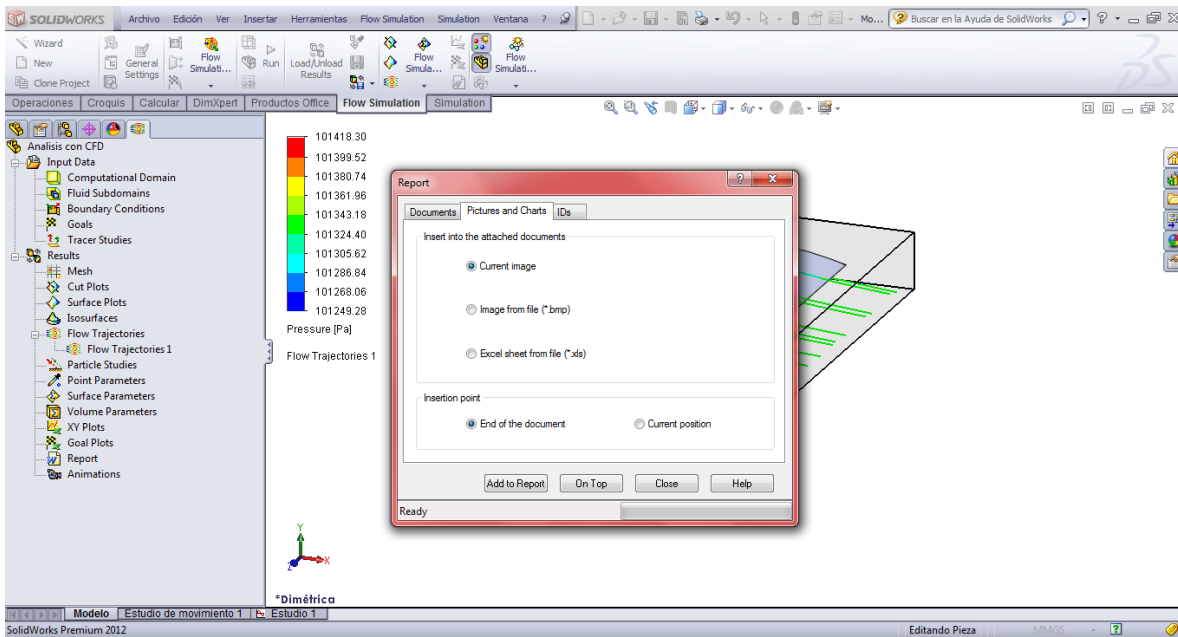


Figura 143. Generación de reporte de resultados

Se hace clic en la pestaña **IDs**, se selecciona **Full**, para que el reporte sea completo, y finalmente se hace clic en **Add to Report** (Añadir al reporte) (Figura 144).



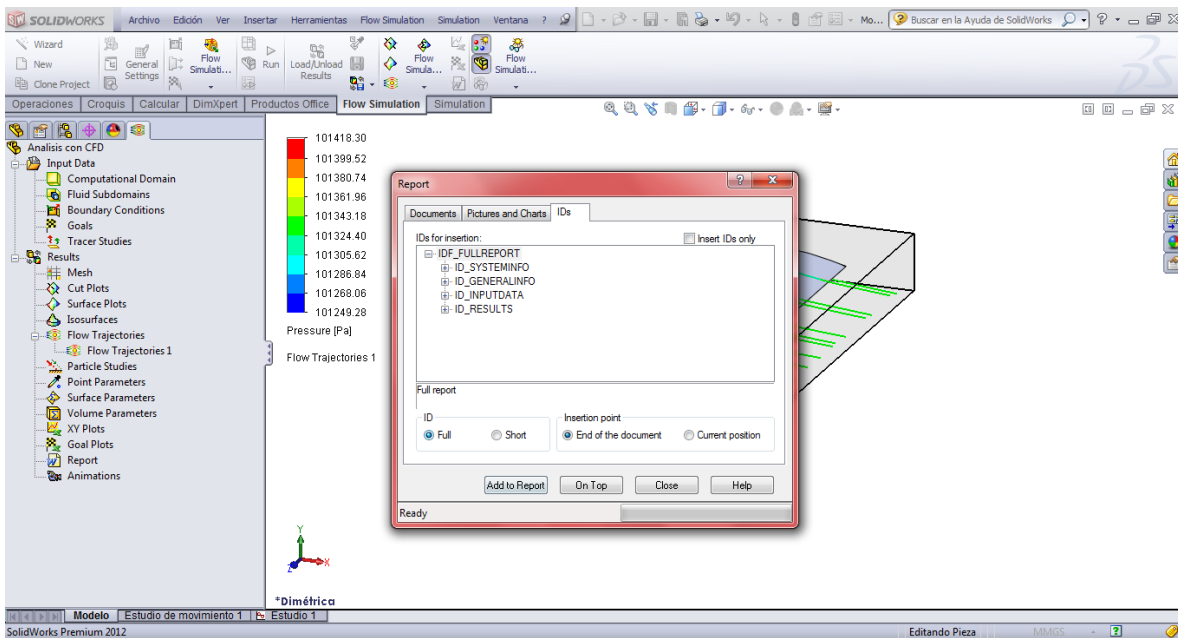


Figura 144. Generación de reporte de resultados

En la parte inferior se podrá visualizar el progreso de generación del reporte a través de una barra color verde (**Figura 145**).

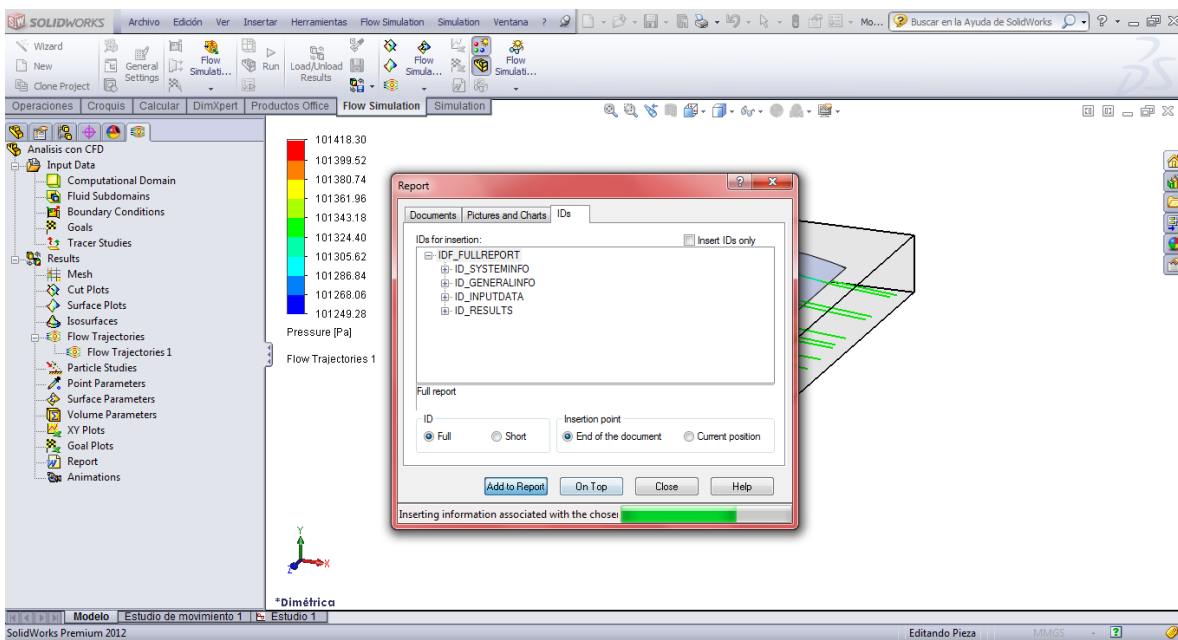


Figura 145. Generación de reporte de resultados

Al finalizar el proceso anterior, se abrirá automáticamente un archivo de texto con el título de **FULL REPORT** con toda la información del análisis que se ha realizado (**Figura 146**).

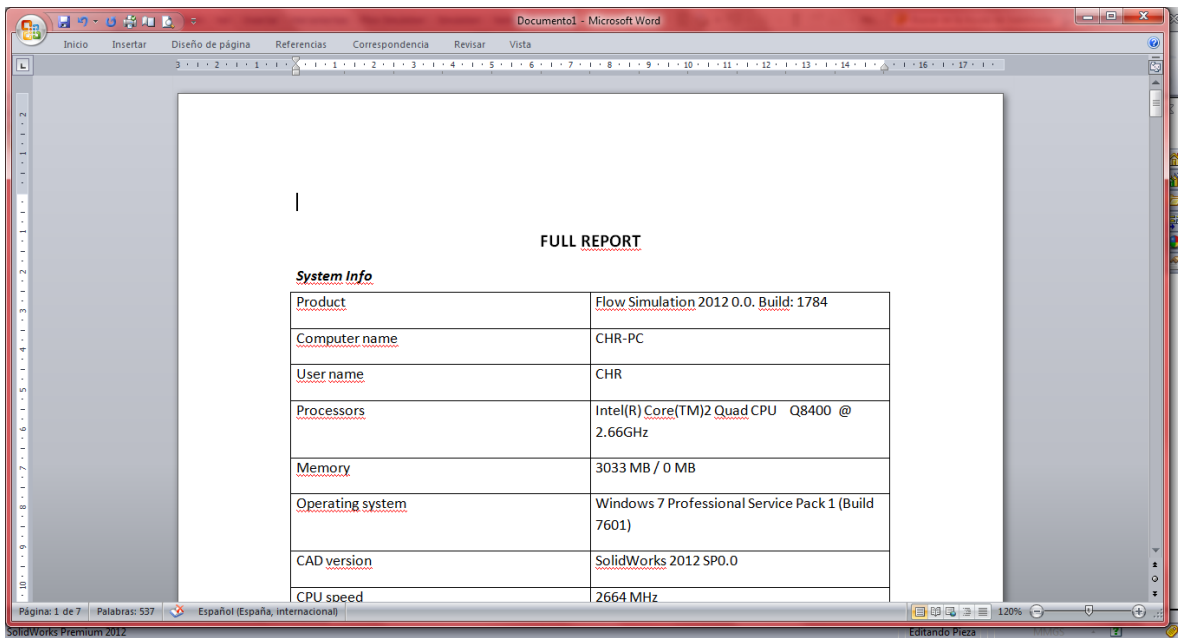


Figura 146. Generación de reporte de resultados

Se cierra la ventana correspondiente a Report (**Figura 147.**).

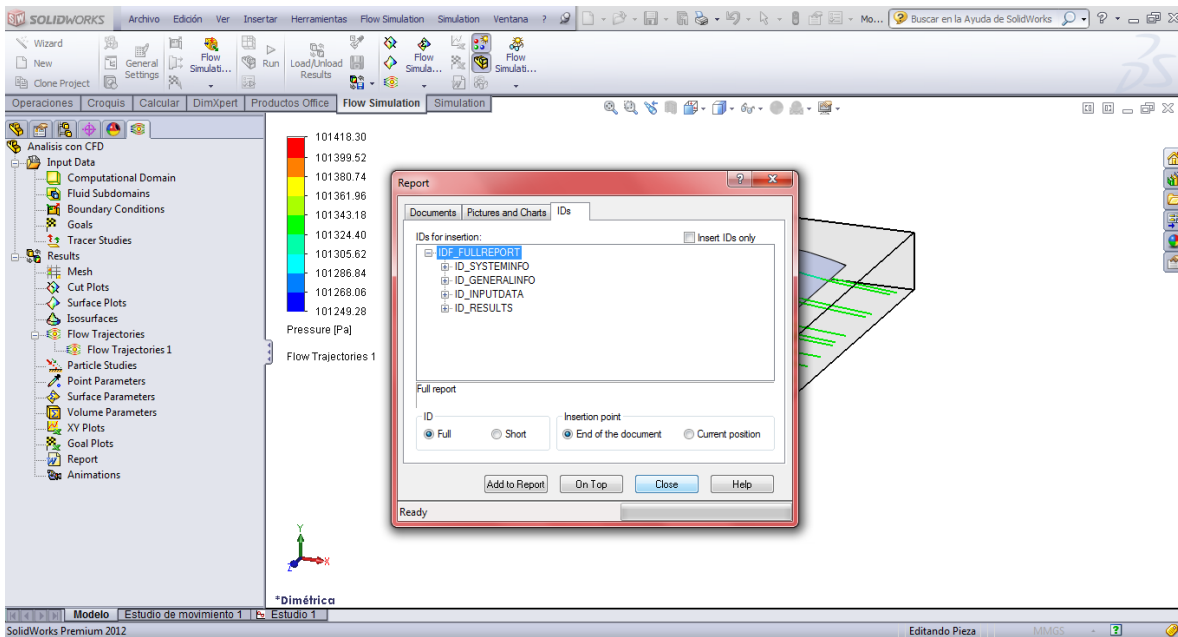


Figura 147. Generación de reporte de resultados

Se pueden elegir algunos parámetros para visualizar y evaluar cada punto de las trayectorias de flujo, tal como Presión, velocidad, densidad, temperatura, etc.

Para ello se hace clic debajo de la barra en la que se muestran los valores correspondientes al parámetro actual, en este caso **Pressure** (Presión) (**Figura 148.**).

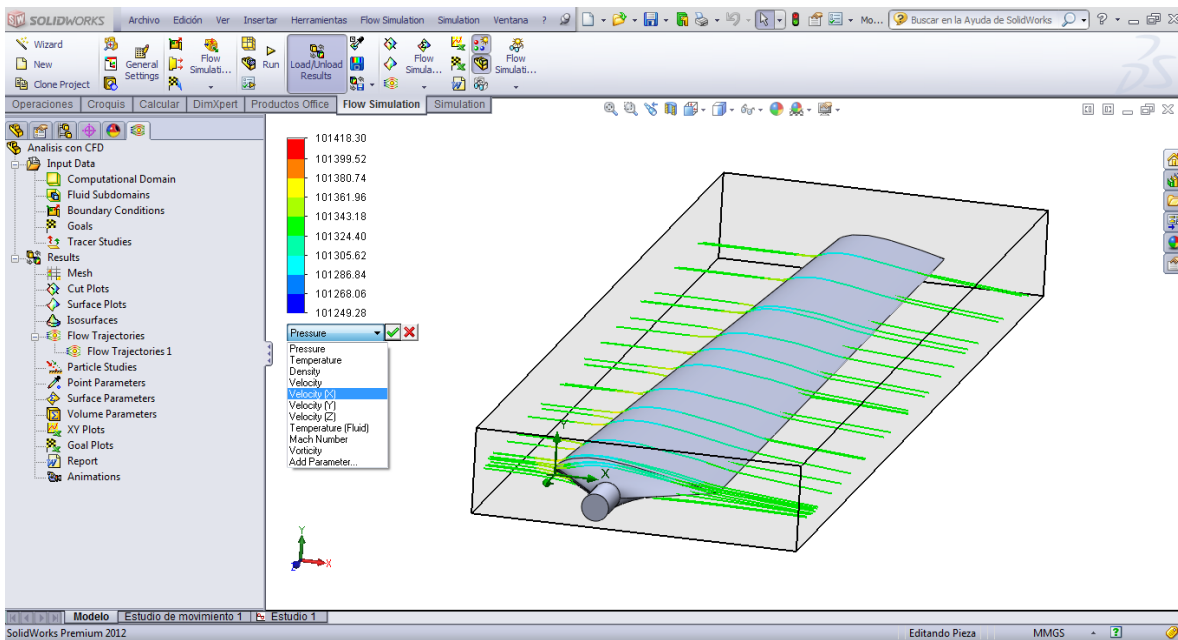


Figura 148. Visualización de parámetros

En este caso se selecciona **Velocity (X)** (Velocidad en el eje X), y luego clic en **Aceptar** (Figura 149).

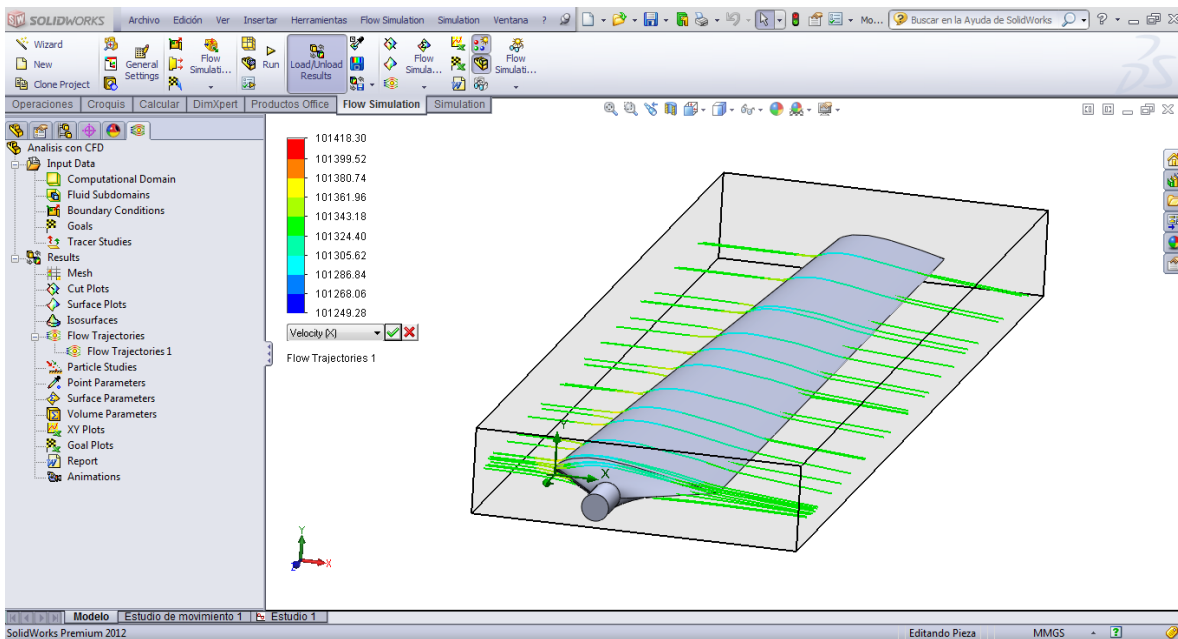


Figura 149. Visualización de parámetros

Finalmente se podrá observar las trayectorias del flujo en relación al parámetro seleccionado (Figura 150).

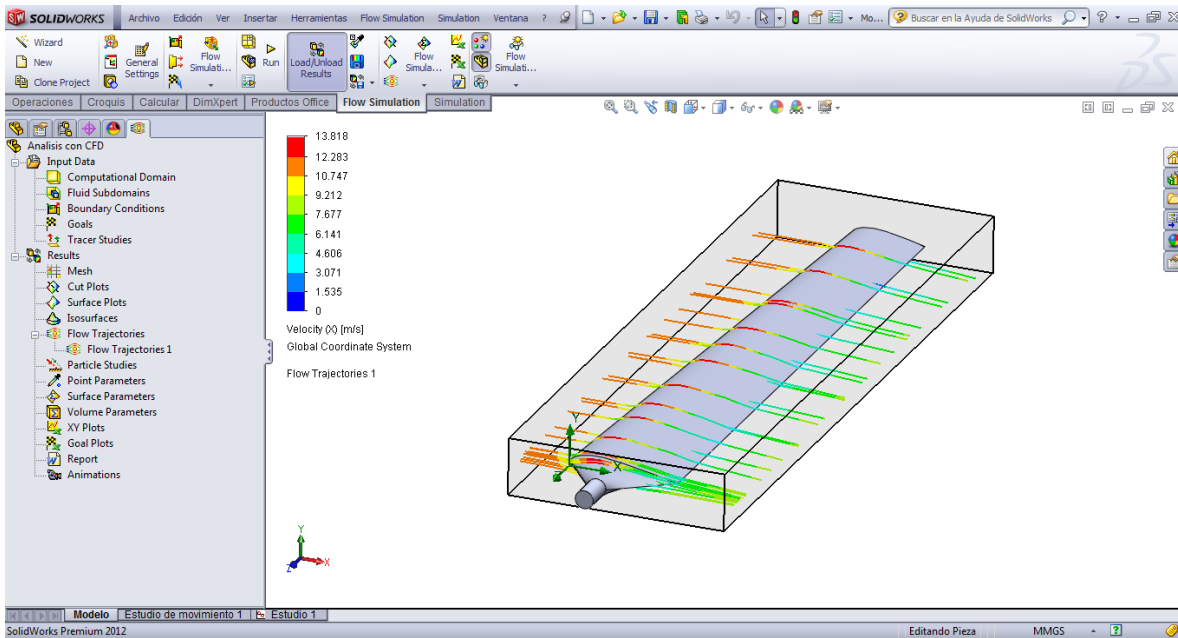


Figura 150. Visualización de parámetros

Así pues se tendrán los resultados en cuanto al comportamiento del flujo al pasar por el modelo de pala de turbinas eólicas con el perfil NACA 4415, y a su vez los datos en cuanto a cargas provocadas por presión del flujo, los mismos que fueron utilizados en los análisis, estático y de fatiga del modelo propuesto.

#### 4. ANÁLISIS ESTÁTICO Y DE FATIGA DEL MODELO (SolidWorks-Simulation)

Para evaluar el comportamiento del modelo al ser sometido a las cargas generadas por la interacción de este con el flujo de aire, se realizó primero un análisis estático y luego uno de fatiga.

##### 4.1. Análisis Estático

Con el archivo del modelo abierto en **SolidWorks**, en la pestaña de **Simulation** se hace clic en **Asesor de Estudios/Nuevo estudio (Figura 151.)**.

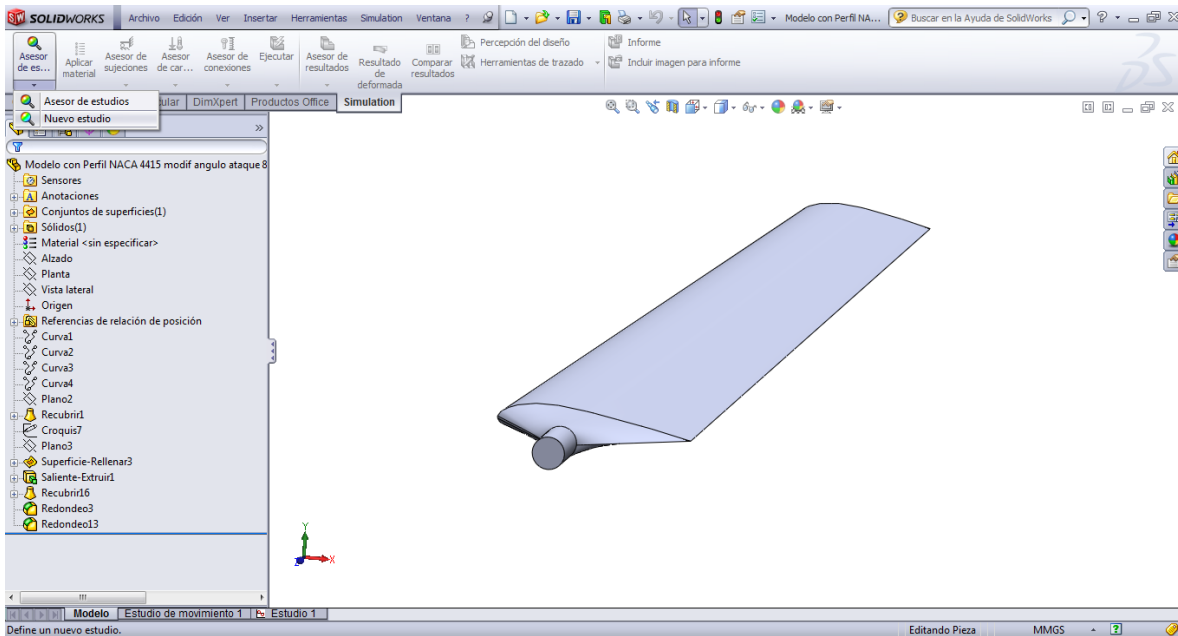


Figura 151. Definir nuevo estudio

Se selecciona como tipo de estudio, **Estudio Estático**, y luego se hace clic en **Aceptar** (Figura 152.).

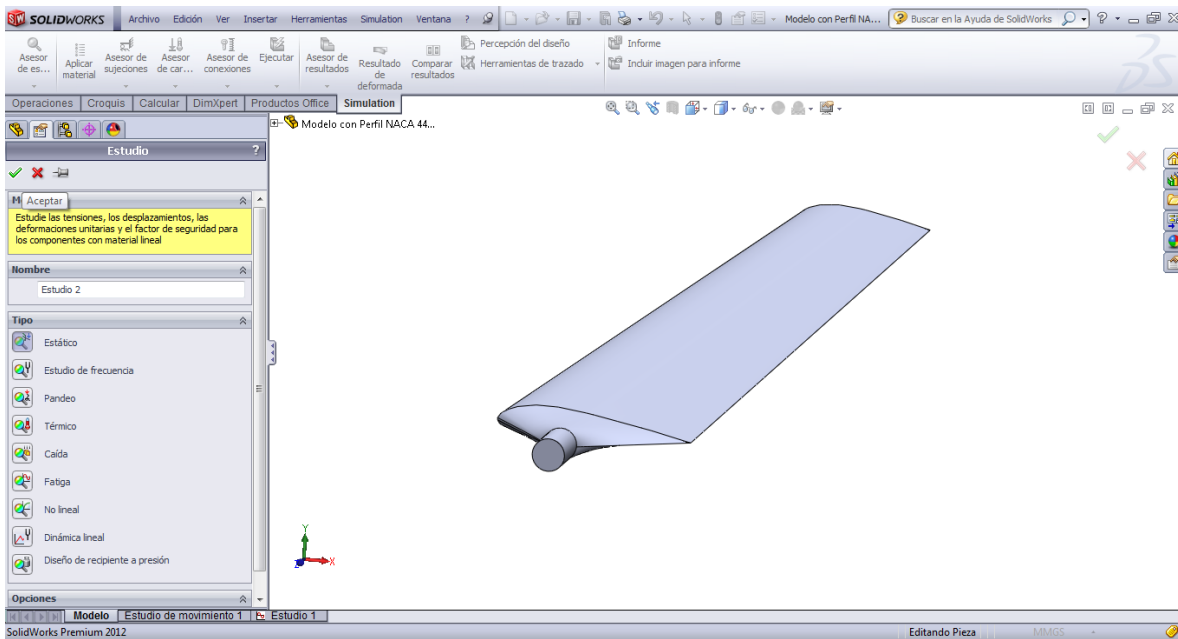


Figura 152. Definir Estudio Estático

Se determinan las sujeciones, es decir las superficies que se idealizaran como fijas para el análisis. Para esto se hace clic en **Sujeciones/Geometría fija** (Figura 153.).

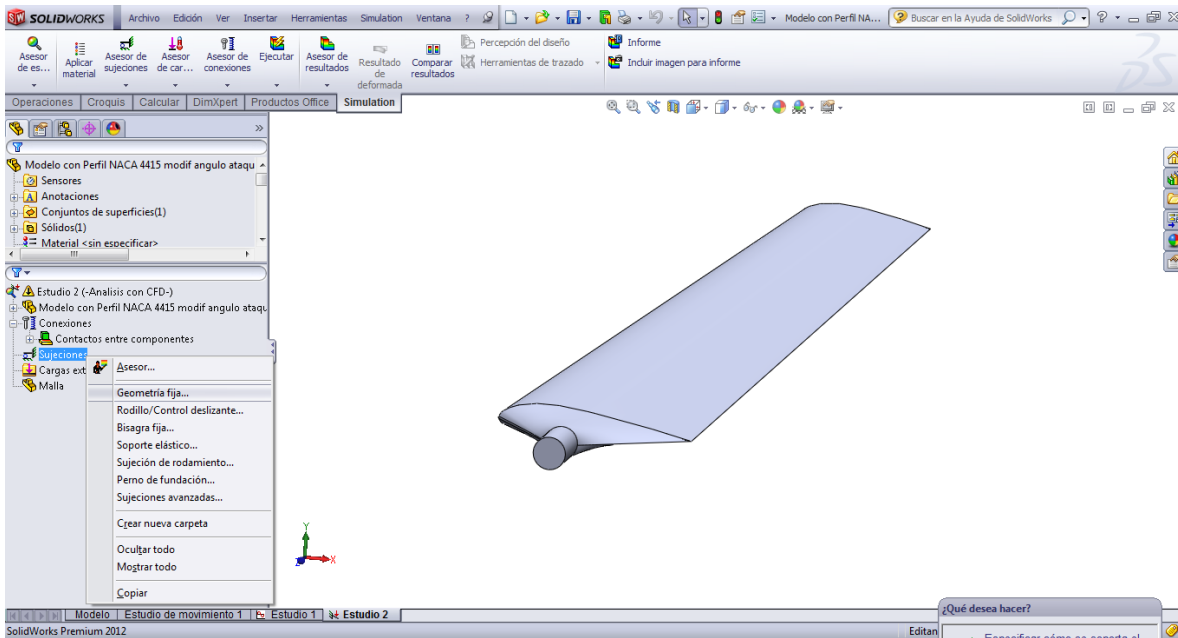


Figura 153. Definir sujeciones

Aparecerá una ventana para configurar las sujeciones (**Figura 154.**).

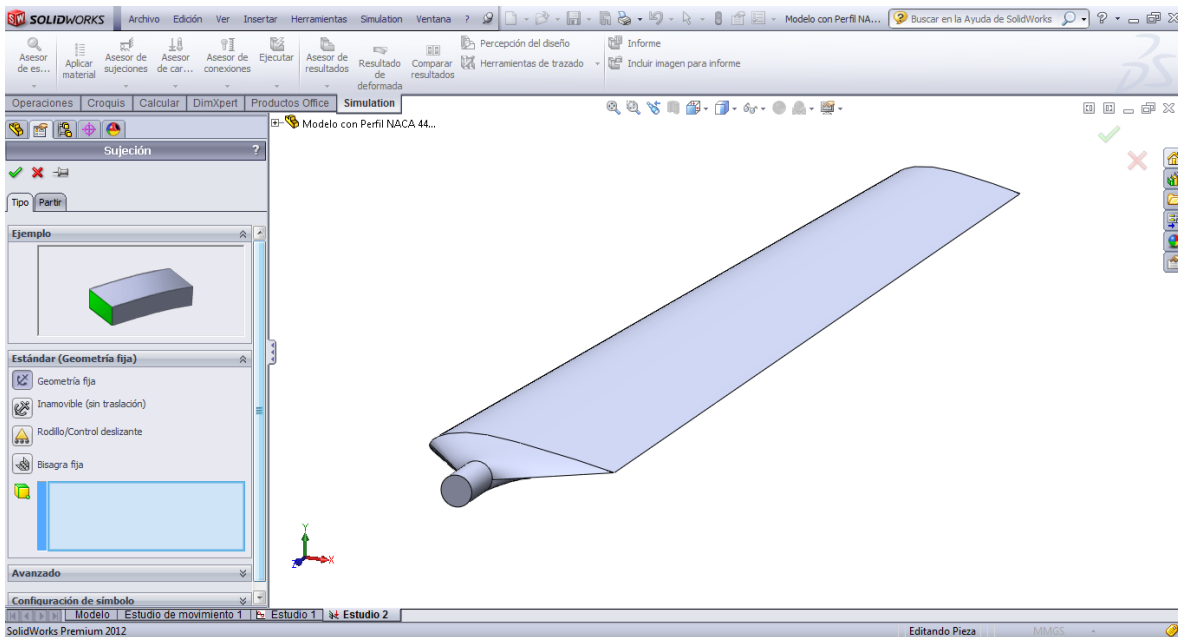


Figura 154. Definir sujeciones

En este caso se hace clic en la superficie lateral del cilindro que se encuentra en la raíz del modelo, así esta quedará seleccionada como sujeción, luego se hace clic en **Aceptar** (**Figura 156.**).

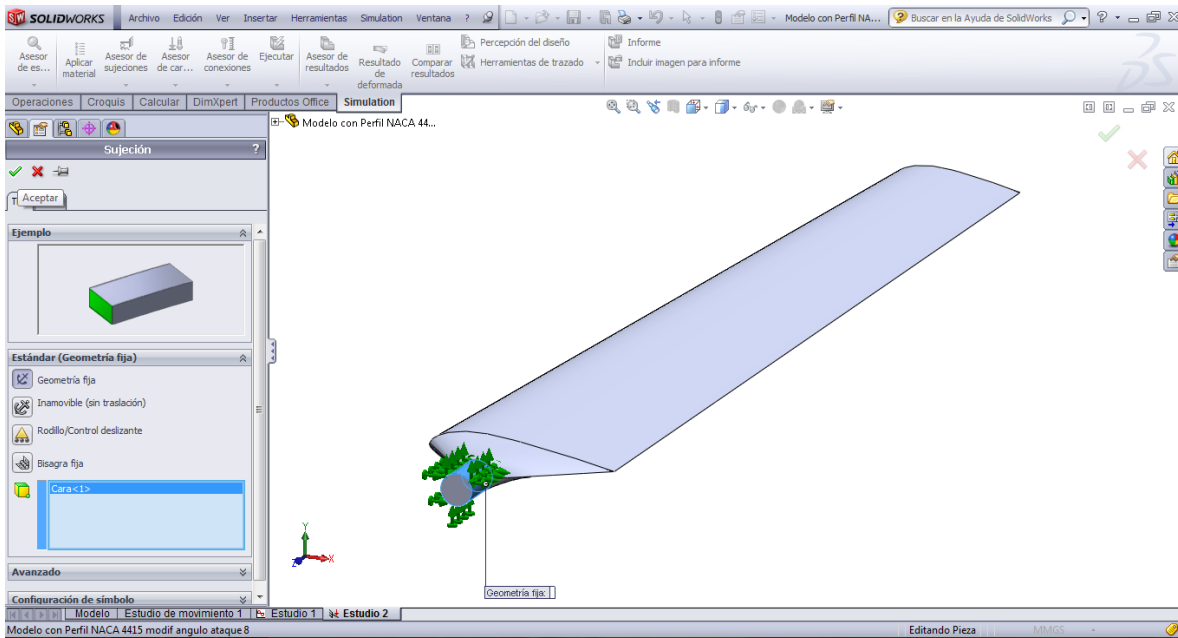


Figura 155. Definir sujeciones

Lo siguiente es definir las cargas externas, para esto se hace clic en **Cargas externas/Gravedad** (Figura 156).

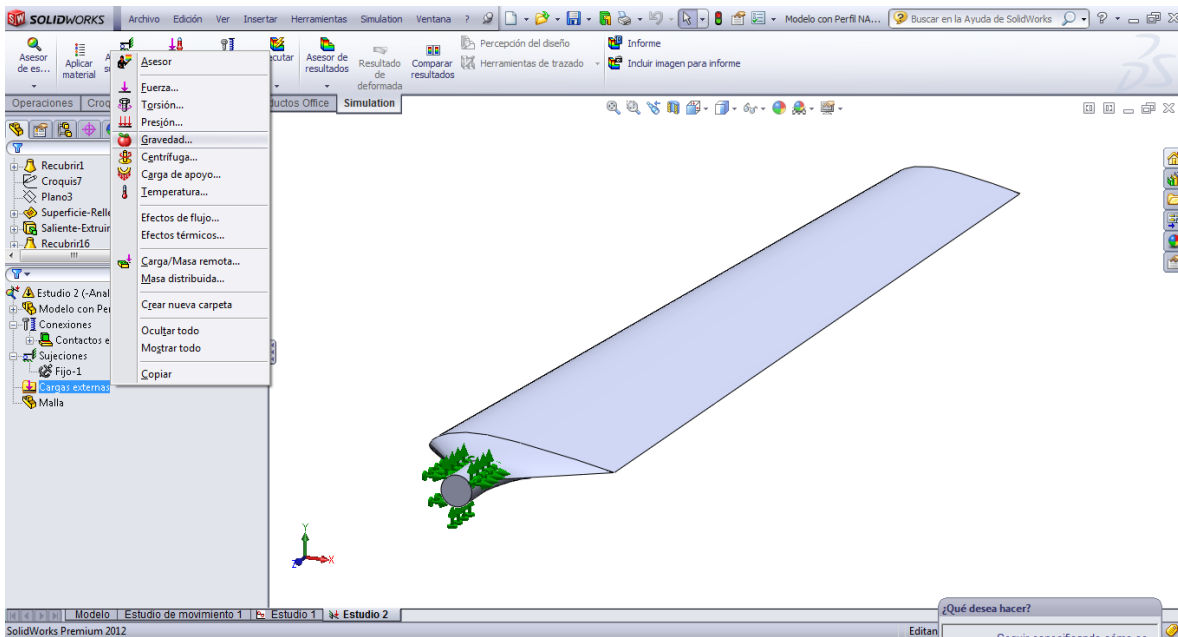


Figura 156. Definir cargas externas

Aparecerá una ventana en la cual se configura los parámetros para la carga de gravedad, se define el plano de acción de la gravedad, en este caso el plano de **planta**, y la dirección. Finalmente se hace clic en **Aceptar** (Figura 157).

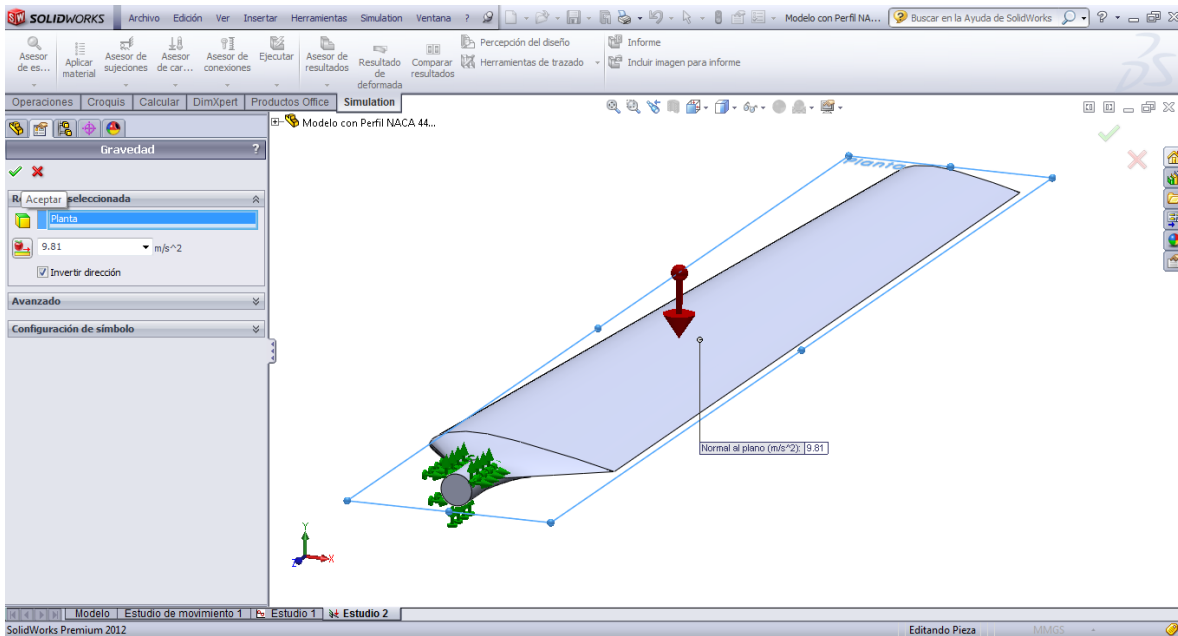


Figura 157. Definir cargas externas

Seguidamente se definió como otra carga externa los efectos de flujo de los resultados obtenidos en la simulación con **Flow Simulation**. Para esto se hace clic en **Carga externa/Efectos de flujo** (Figura 158.).

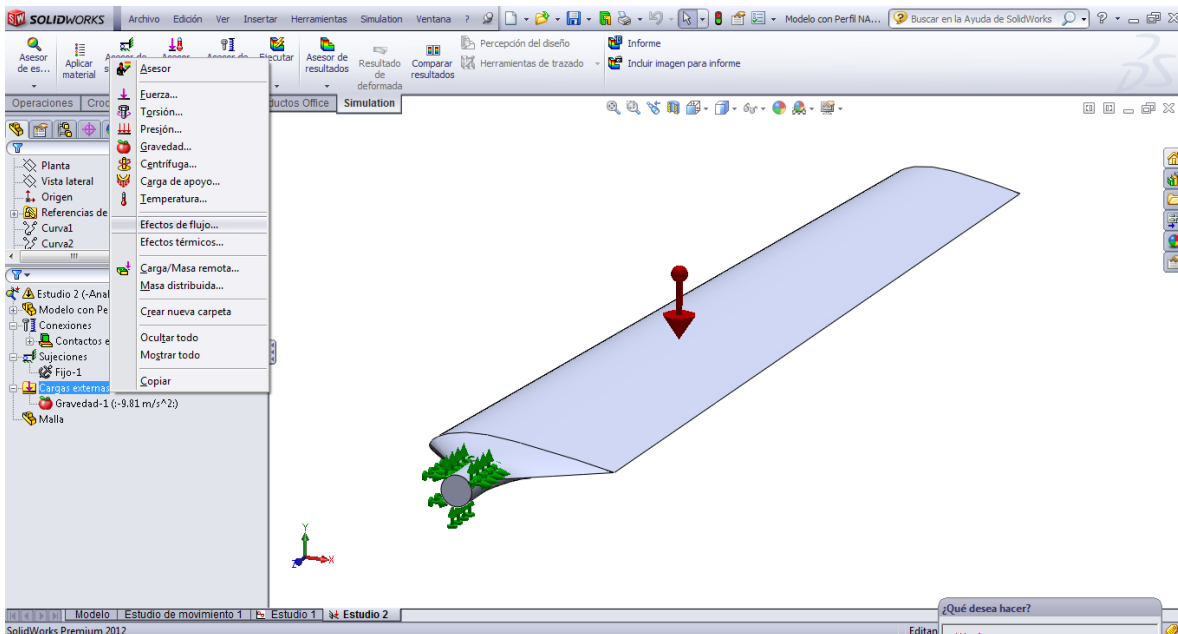


Figura 158. Definir cargas externas

Aparecerá una ventana con el título **Estático** (Figura 159.).



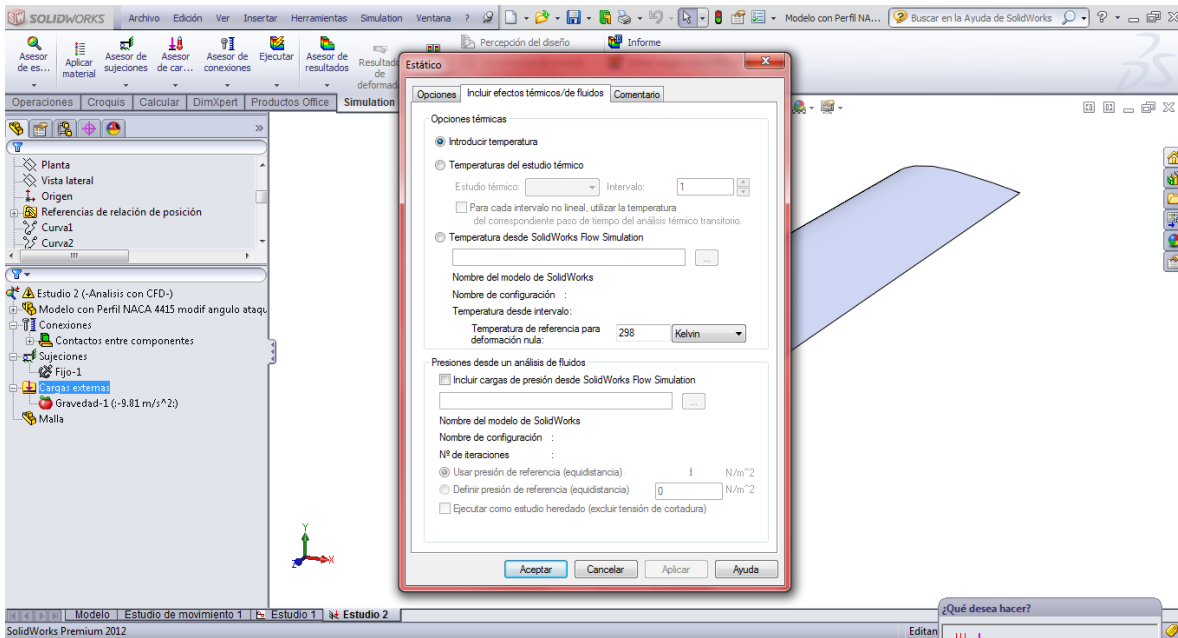


Figura 159. Definir cargas externas

Se hace clic en **Incluir cargas de presión desde SolidWorks Flow Simulation** (Figura 160.).

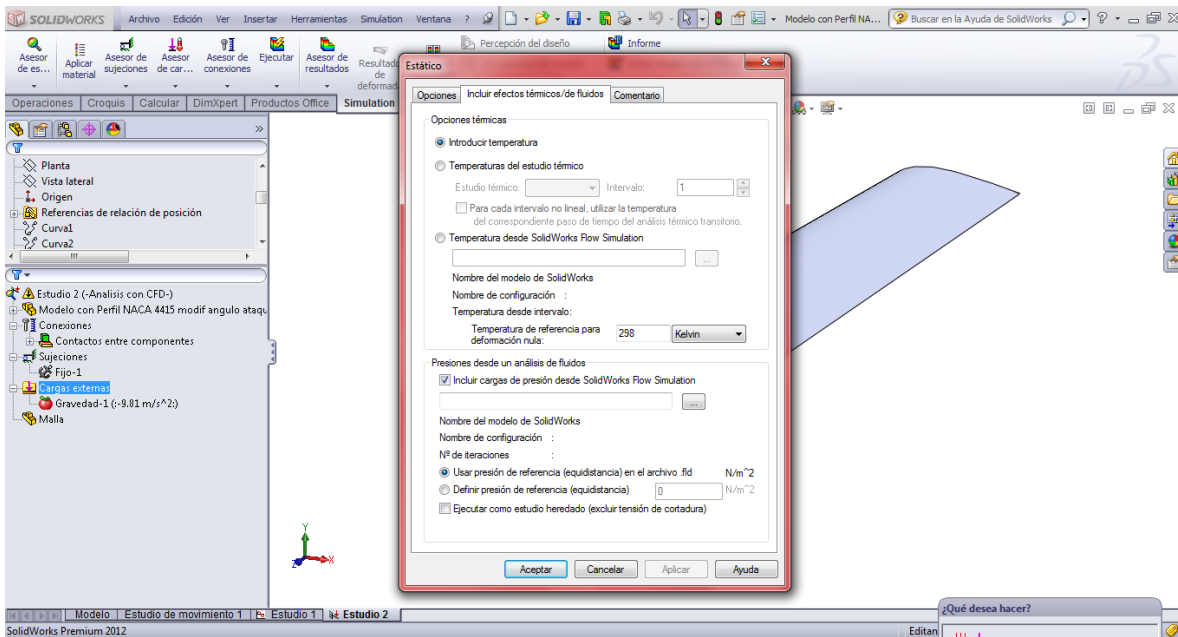


Figura 160. Definir cargas externas

Y luego se hace clic en el botón con puntos suspensivos(...), para ubicar el archivo con extensión **(.fld)** que contiene los resultados del análisis de flujo (Figura 161.).

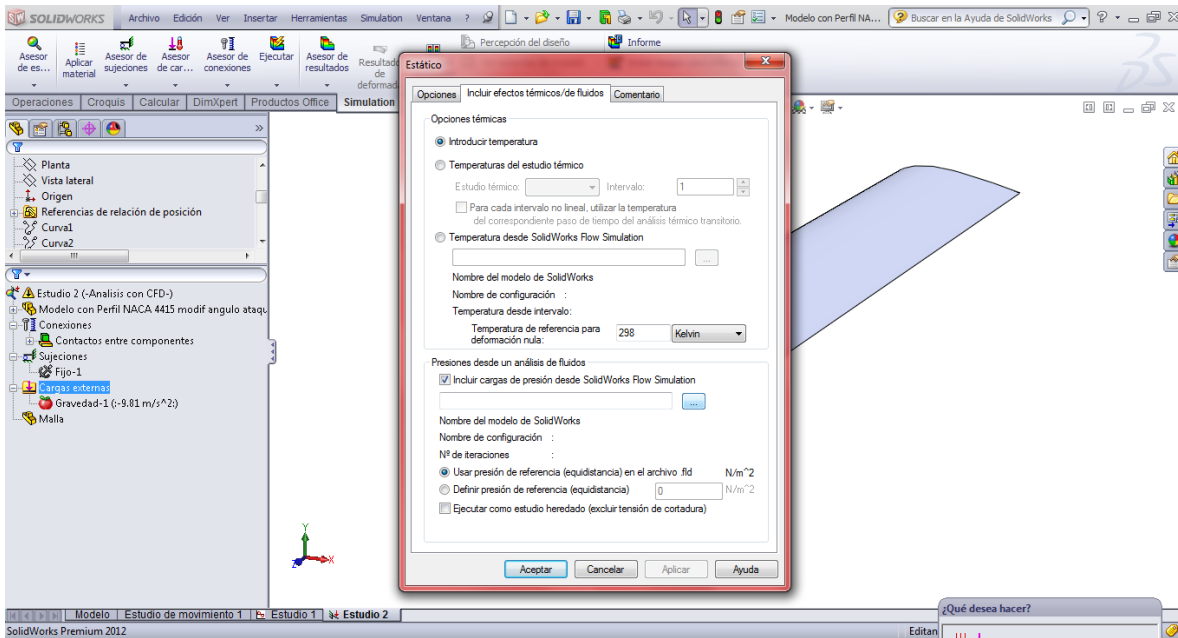


Figura 161. Definir cargas externas

Aparecerá una ventana para ubicar el fichero en el cual se ubica el archivo. Este archivo se encuentra en el directorio en el cual se encuentra el archivo del modelo con el cual se realizó el análisis de flujo. Existen carpetas numeradas, el archivo deseado se encuentra siempre en la última carpeta numerada, en este caso la número 12 (**Figura 162.**).

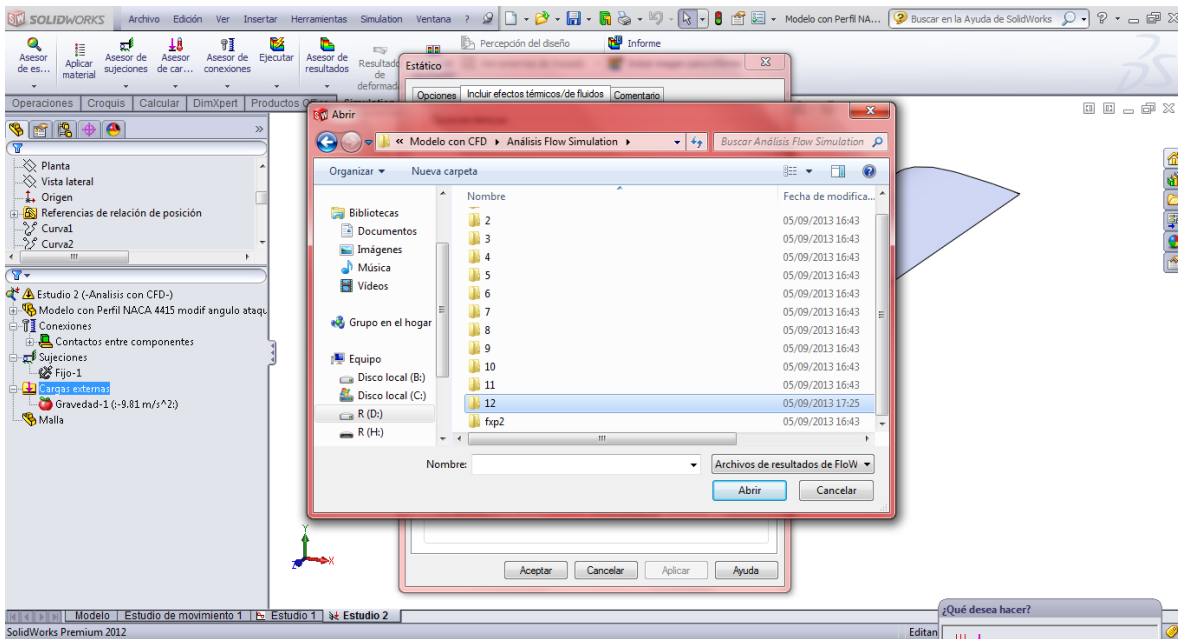


Figura 162. Definir cargas externas

Al abrir la carpeta mencionada anteriormente, se observarán dos archivos con extensión (.fld), de los cuáles el que tiene el mismo nombre que la carpeta mencionada es el archivo con los resultados del análisis de flujo, se lo selecciona y se hace clic en Abrir (**Figura 163.**).

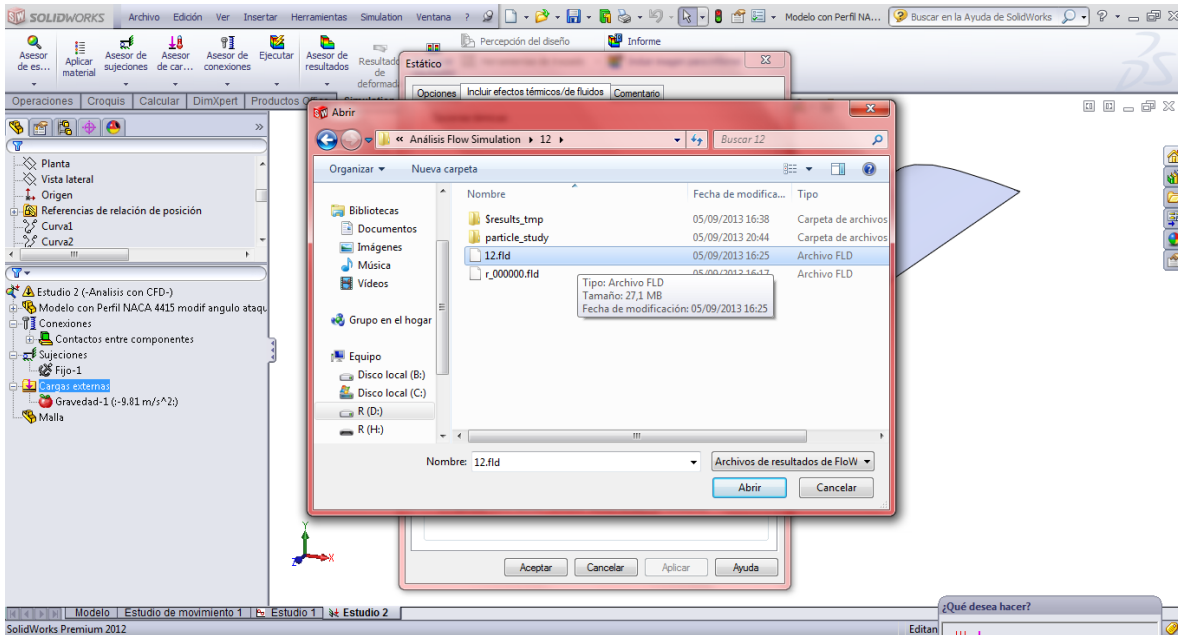


Figura 163. Definir cargas externas

Luego de esto se podrá apreciar que en **Nombre de modelo de SolidWorks**, **Nombre de configuración**, y **Nº de Iteraciones**, aparecerán los datos del archivo cargado. Se hace clic en **Aceptar**(**Figura 164.**).

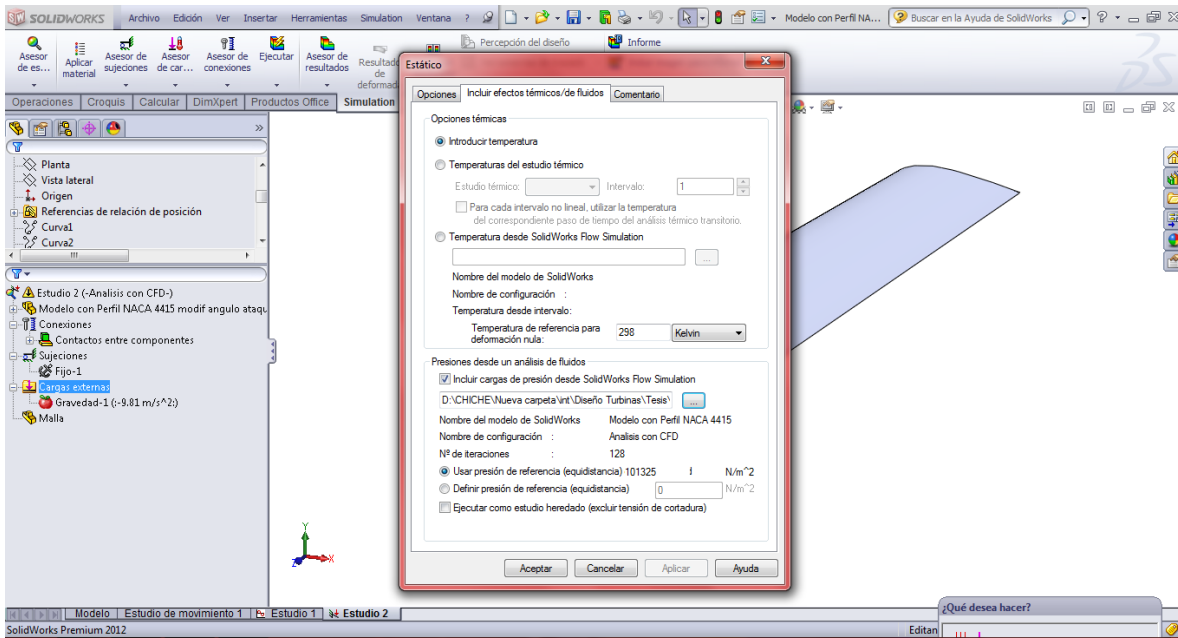


Figura 164. Definir cargas externas

Se podrá apreciar que en cargas externas, debajo de la carga de gravedad, aparecerán 4 cargas más resultantes de los efectos de flujo(Figura 165).

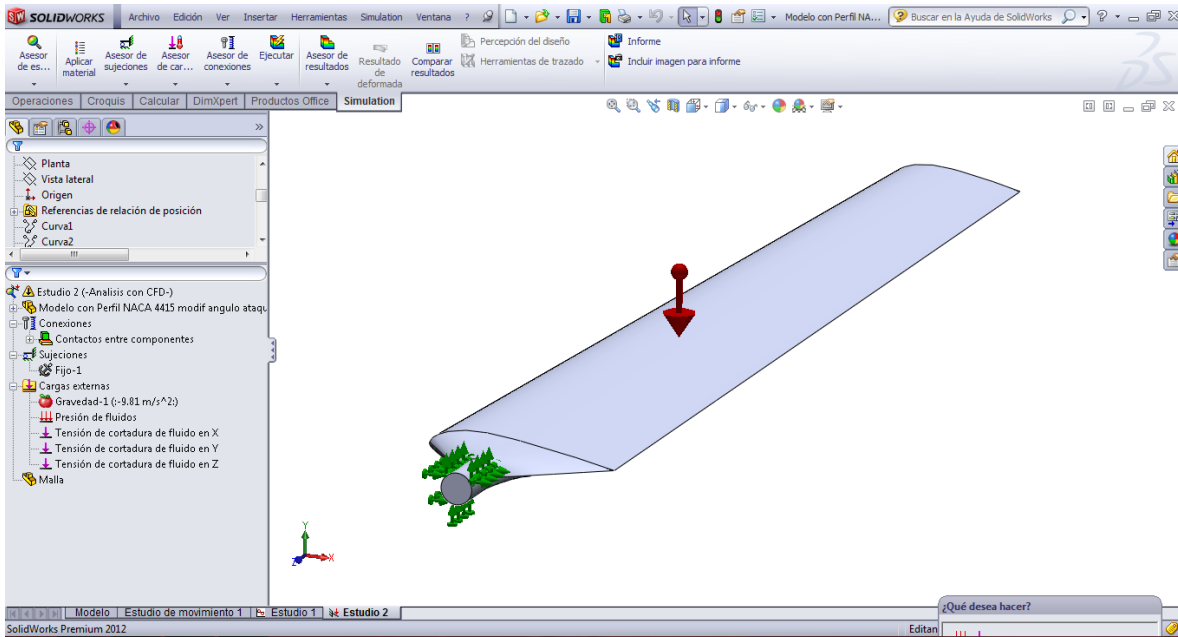


Figura 165. Definir cargas externas

Después se deben excluir del análisis todas las superficies de referencia que no sean parte del modelo, ya que estas crearan conflictos al momento de generar la malla(Figura 166.).

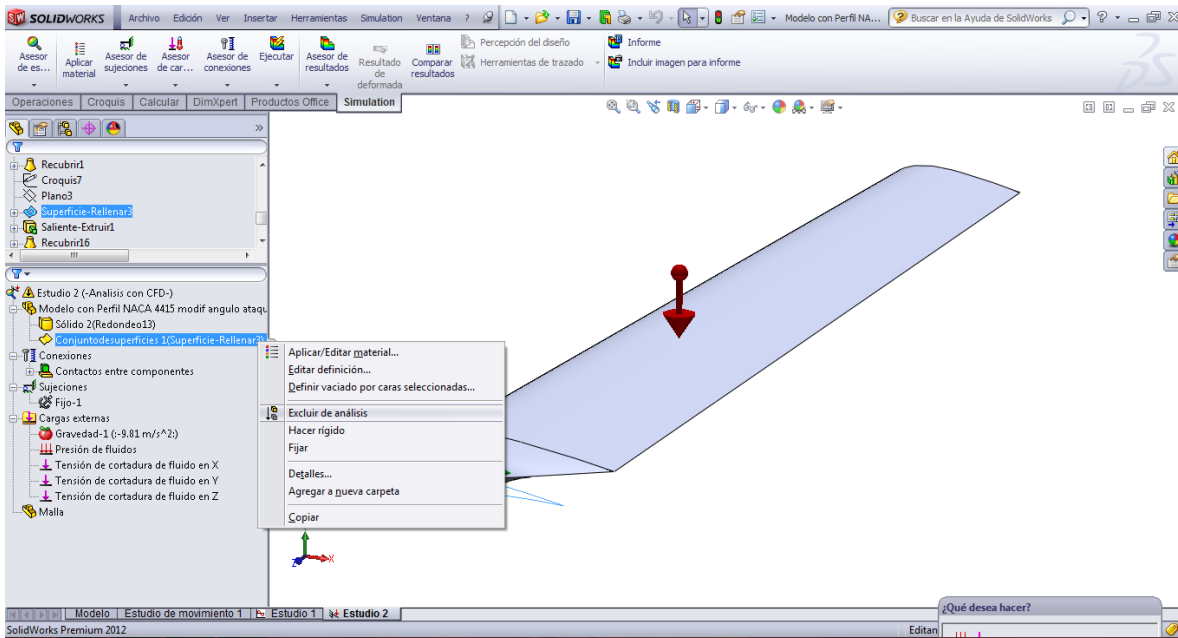


Figura 166. Excluir superficies de referencia

A continuación se creara una malla para la ejecución del análisis. Para esto se hace clic derecho en **Malla/Crear malla(Figura 167.)**.

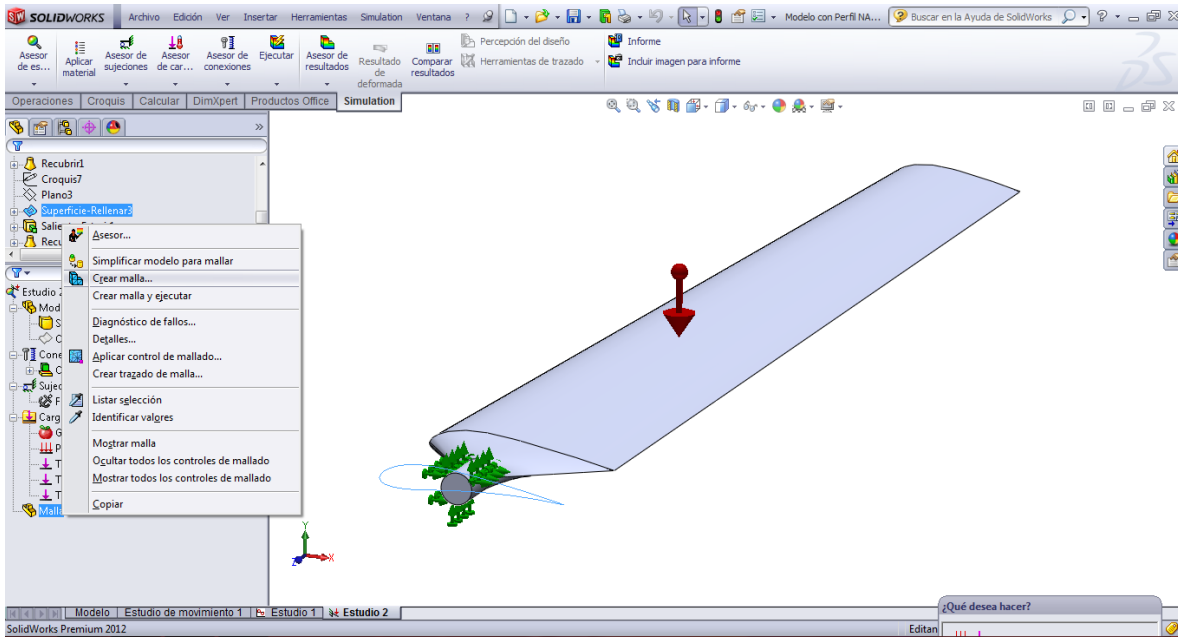


Figura 167. Crear Malla

Aparecerá una ventana para configurar la densidad de la malla. Se hace clic en **Parámetros de mallas(Figura 168.)**.

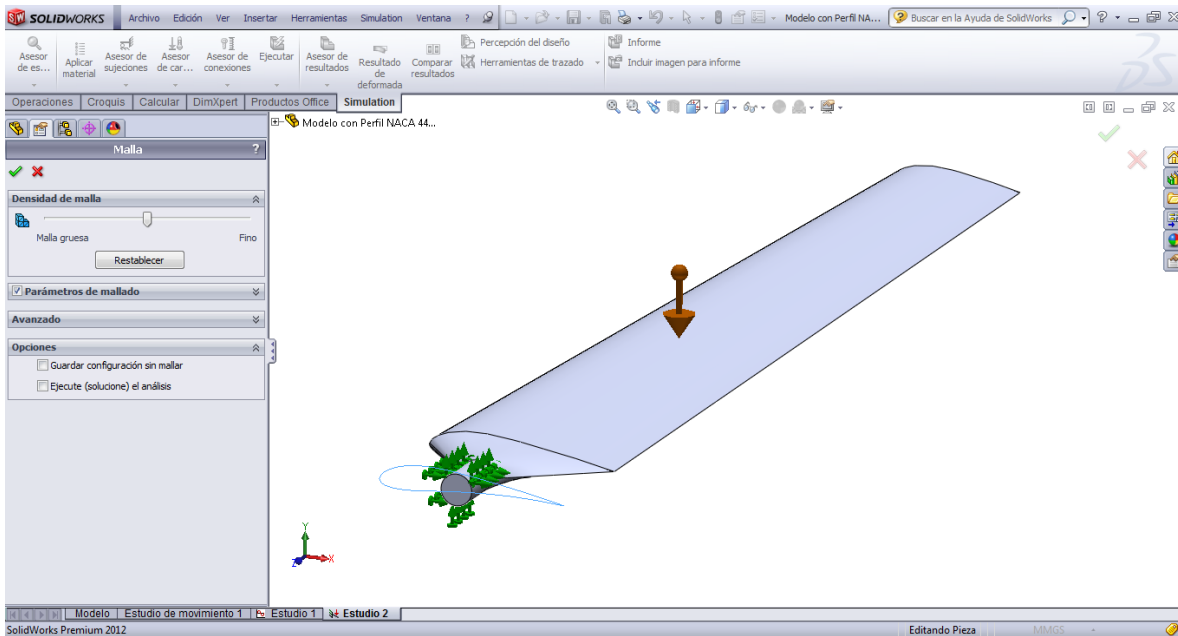


Figura 168. Crear Malla

Se podrá ingresar valores para obtener la malla deseada(Figura 169.).

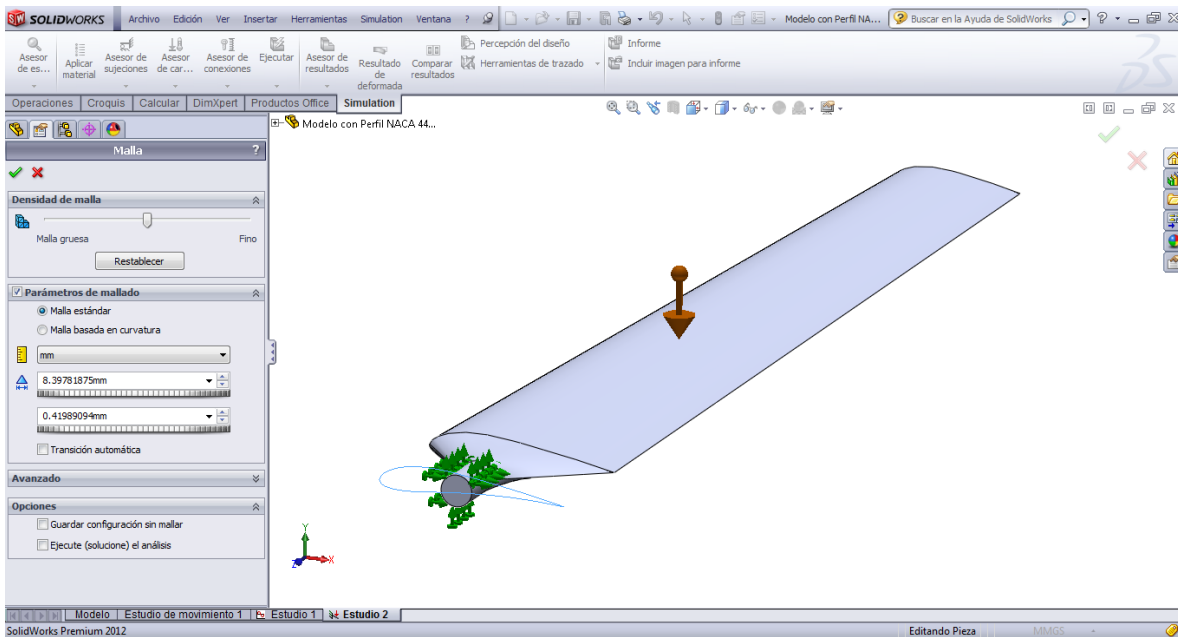


Figura 169. Crear Malla

En este caso, en el valor global se ingresará un valor de 5mm, lo que automáticamente hace cambiar en la densidad de malla, a una malla fina, ya que entre más fina sea la malla la solución será más precisa y tendrá más calidad, pero así mismo el análisis demandará más tiempo. Por último se hace clic en **Aceptar**(Figura 170.).

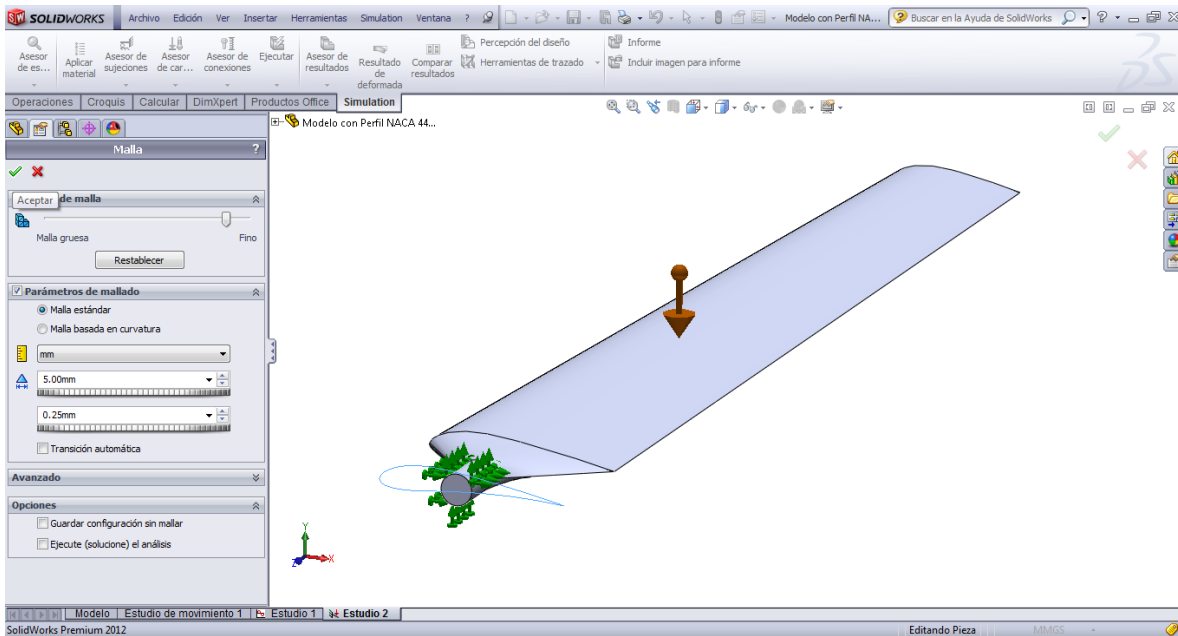


Figura 170. Crear Malla

Al instante aparecerá una ventana que indica el progreso de mado(**Figura 171.**).

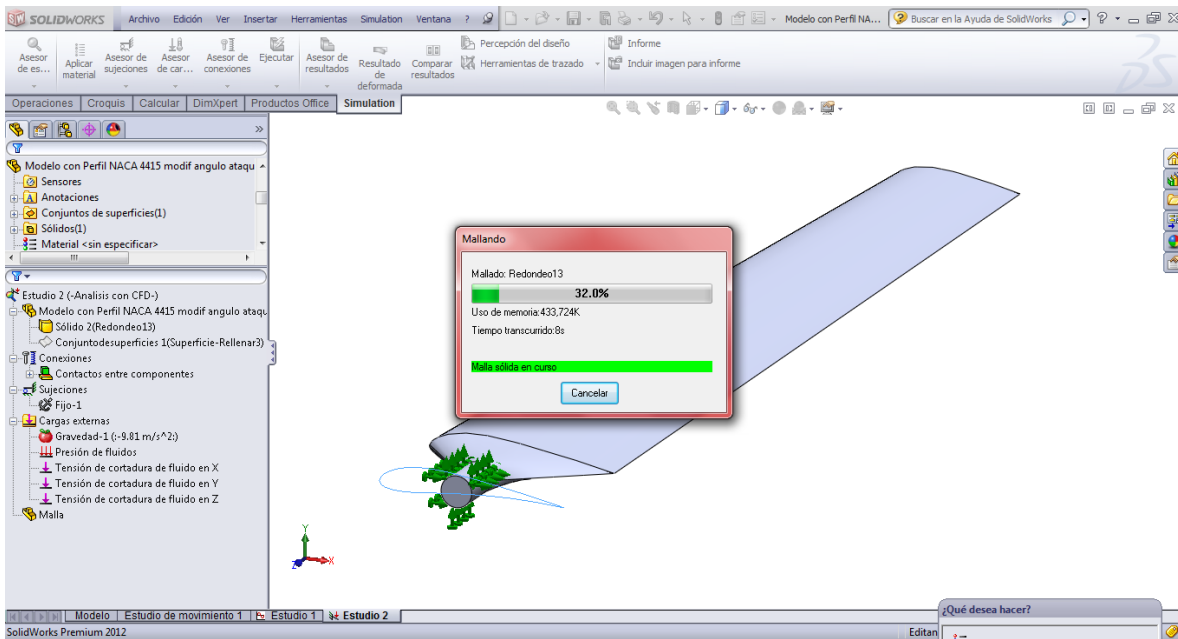


Figura 171. Crear Malla

Al finalizar el proceso de mado se apreciará el modelo dividido en pequeñas partes formando una malla, la resolución de dicha malla o el nivel de detalle depende de la densidad de la malla, entre más fina, más detallada(**Figura 172.**).



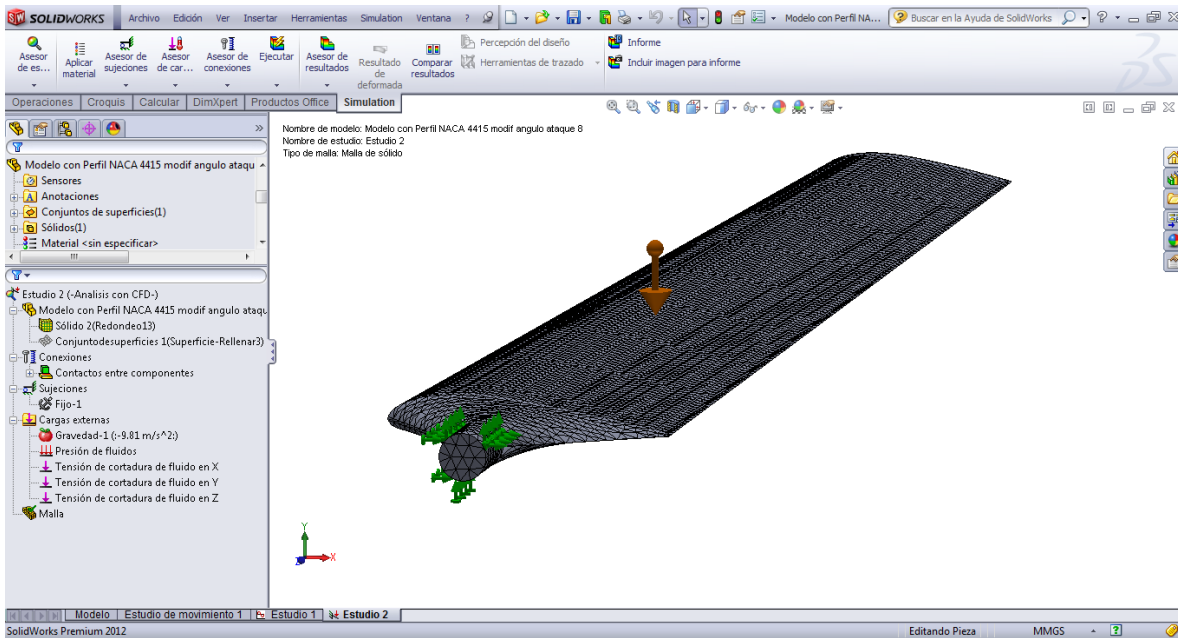


Figura 172. Crear Malla

Para finalizar la configuración del análisis se aplica el material al modelo, para esto se hace clic en **Aplicar material**(Figura 173.).

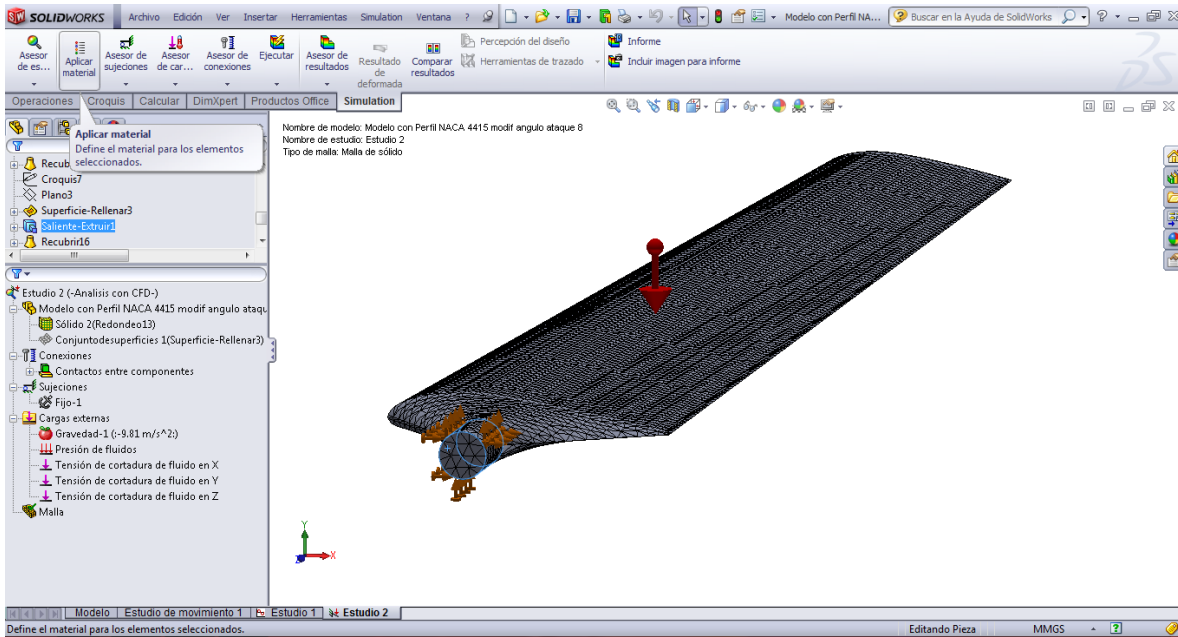


Figura 173. Aplicar material

Aparecerá una ventana con una lista de materiales, en este caso se selecciona la carpeta de maderas, y específicamente madera de **Balsa**, la cual posee las características mecánicas



apropiadas en cuanto a rigidez y tenacidad, para esta aplicación. Se hace clic en **Aplicar** y luego en **Cerrar**(Figura 174.).

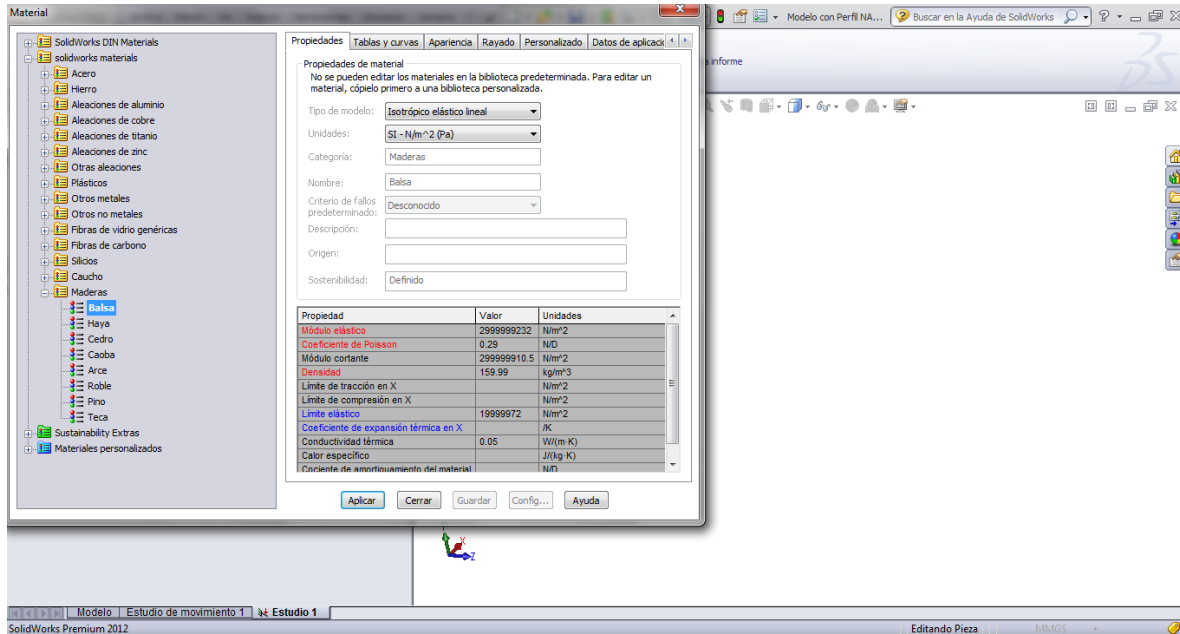


Figura 174. Aplicar material

El último paso es ejecutar el análisis, para esto se hace clic en **Ejecutar**(Figura 175.).

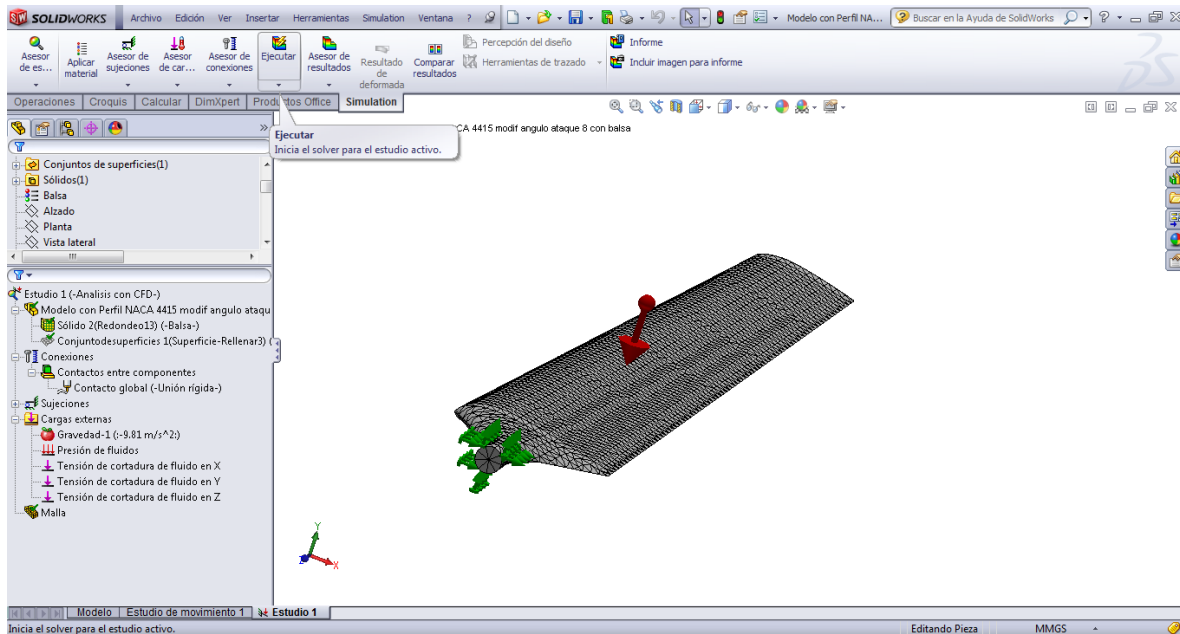


Figura 175. Ejecutar análisis

Aparecerá una pequeña ventana mostrando el progreso de solución(Figura 176.).

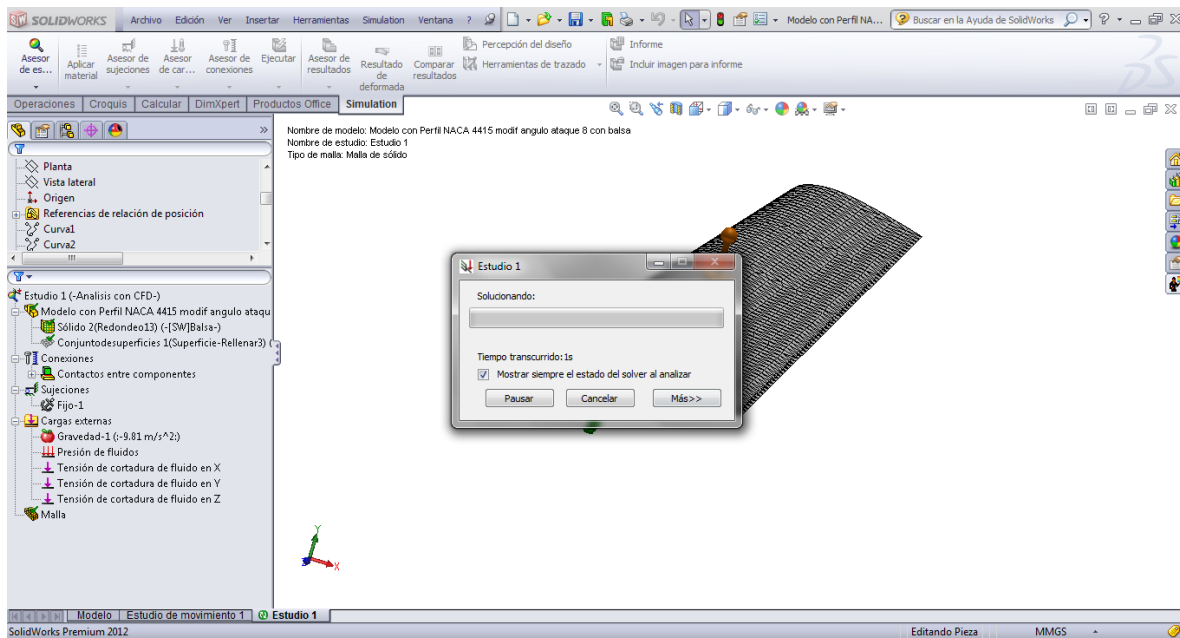


Figura 176. Ejecutar análisis

Al finalizar el análisis, se mostrarán por defecto los resultados de **Tensiones**, en la parte derecha se aprecia la escala de valores de tensión que sufre el modelo, y en la parte inferior de esta escala esta el valor máximo admisible de tensión que soporta ese material. Además se observa la deformación del modelo por efecto de las cargas aplicadas. Esta deformación no es la real, y por defecto se muestran en escalas, en este caso es del 62.16%. (**Figura 177**).

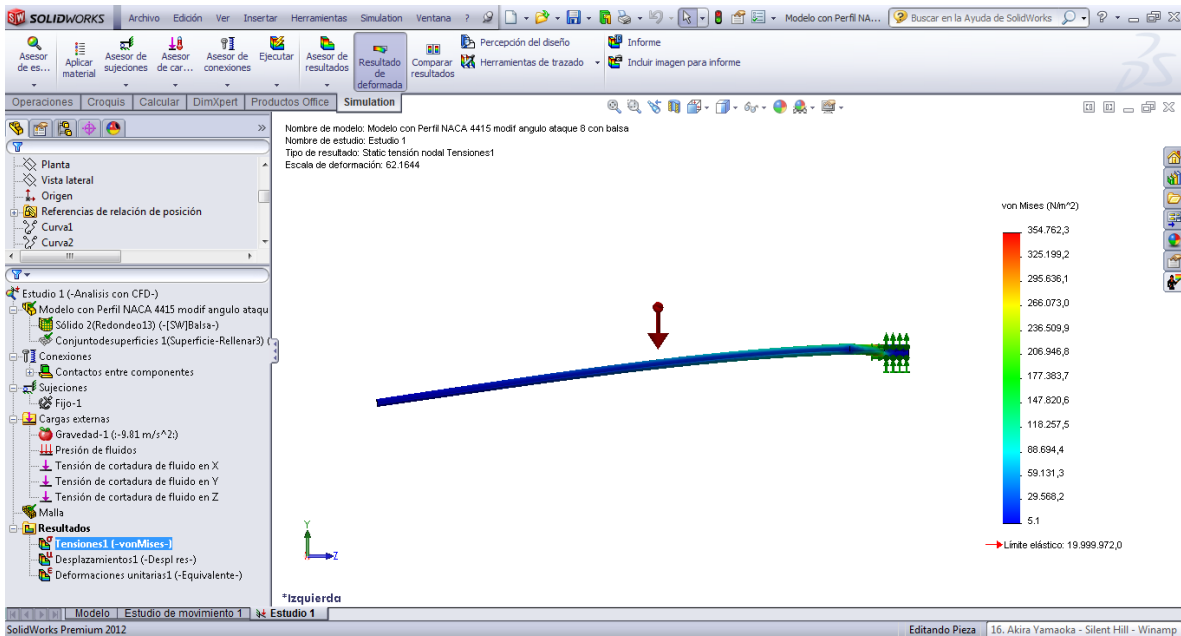


Figura 177. Resultados

Para observar la deformación en la escala real se hace clic derecho sobre los resultados de **Tensiones**, y luego en **Editar definición**(Figura 178.).

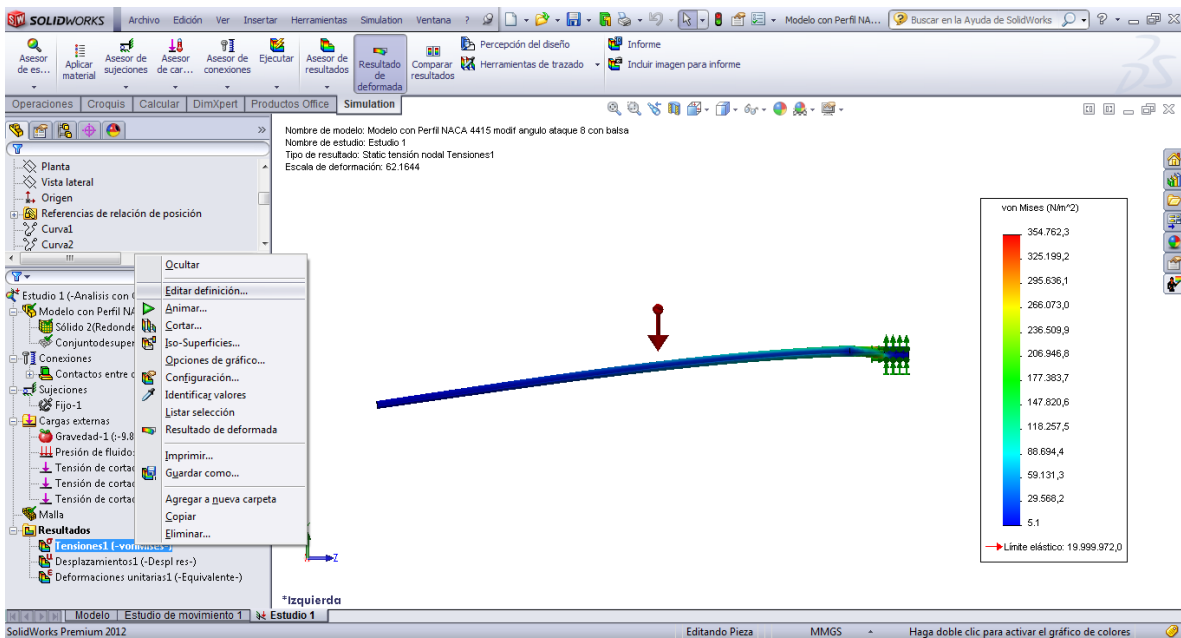


Figura 178. Editar definición de resultados

Aparecerá una ventana de **Trazado de tensiones**, aquí se elige **Escala real** y luego se hace clic en **Aceptar**(Figura 179.).

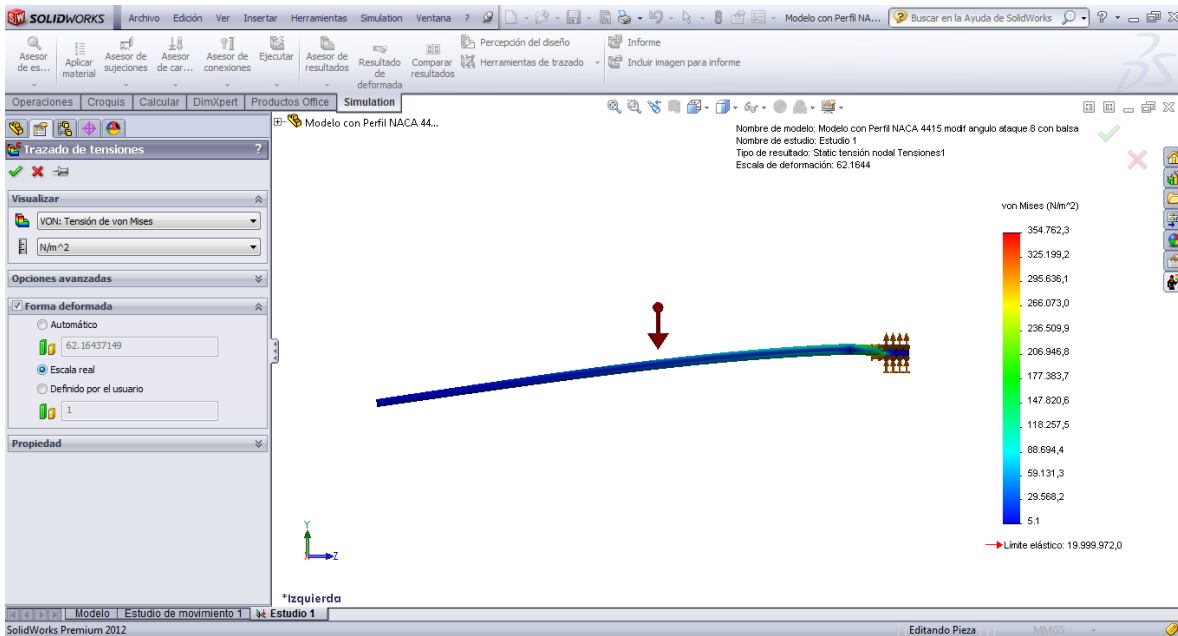


Figura 179. Editar escala

Al final se mostrará la deformación real que sufre el modelo. Para visualizar los resultados de **Desplazamientos**, se hace clic derecho en **Desplazamientos** y luego en **Mostrar**(Figura 180.).

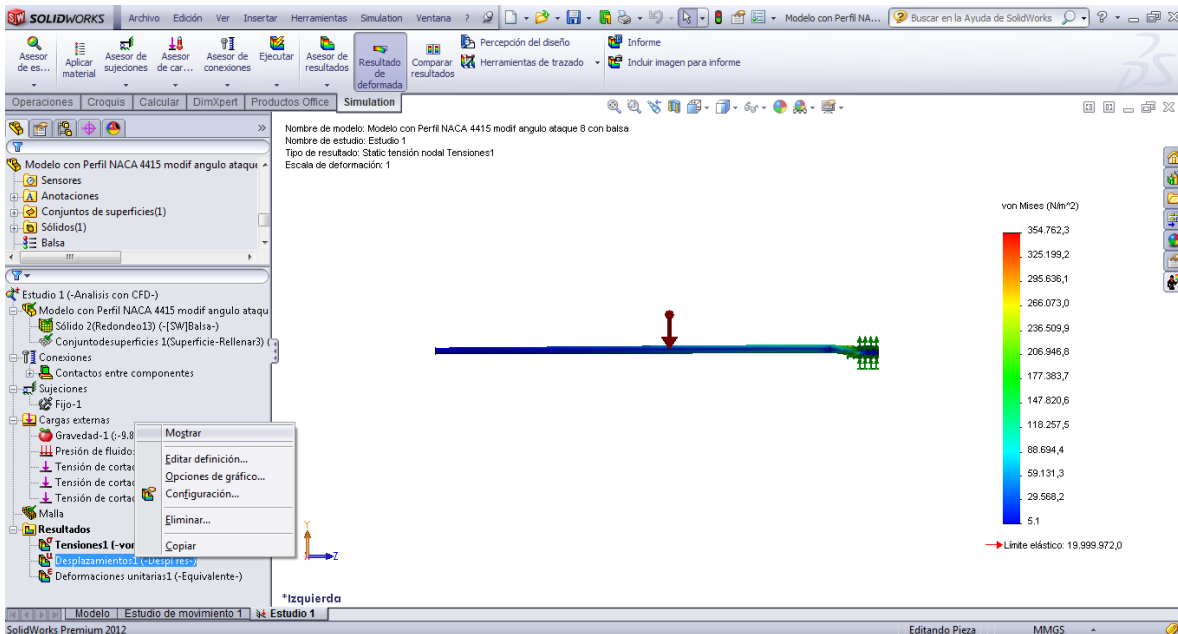


Figura 180. Mostrar Resultados de Desplazamiento

Se visualizará a la derecha la escala de valores de desplazamiento que sufre el modelo en diferentes puntos, y por defecto la escala de deformación será del 62.16% nuevamente. Para

mostrar la escala real se procede de la misma forma que se procedió para cambiar la escala en los resultados de **Tensiones (Figura 181.)**.

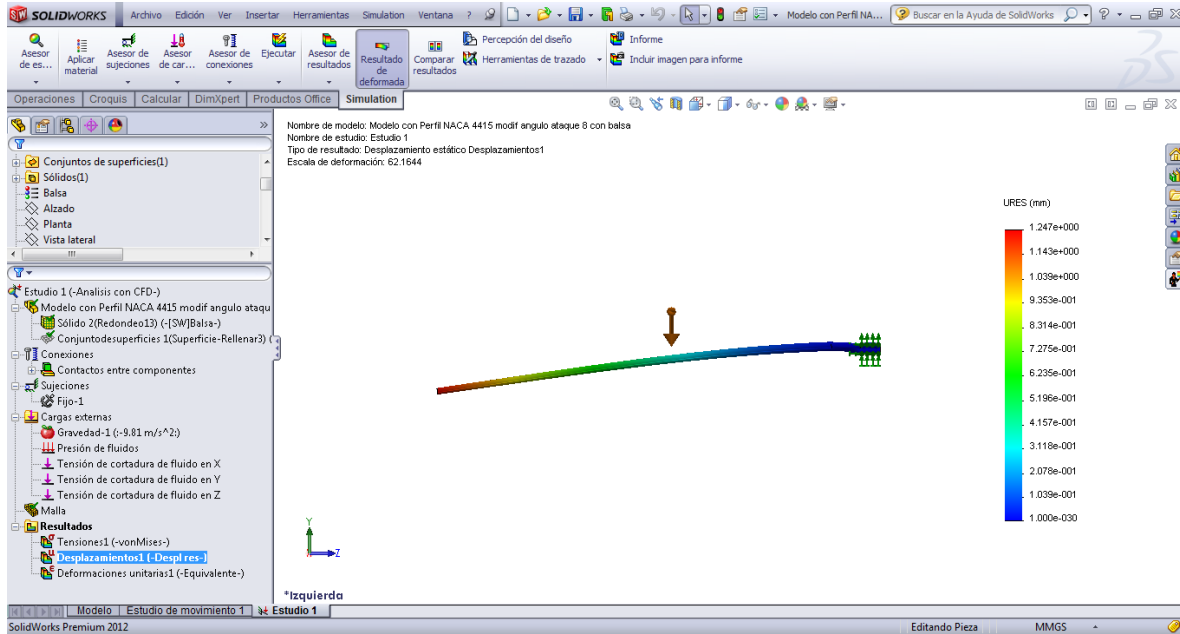


Figura 181. Mostrar Resultados de Desplazamiento

Al final se podrá observar la deformación real que sufre el modelo (**Figura 182.**).

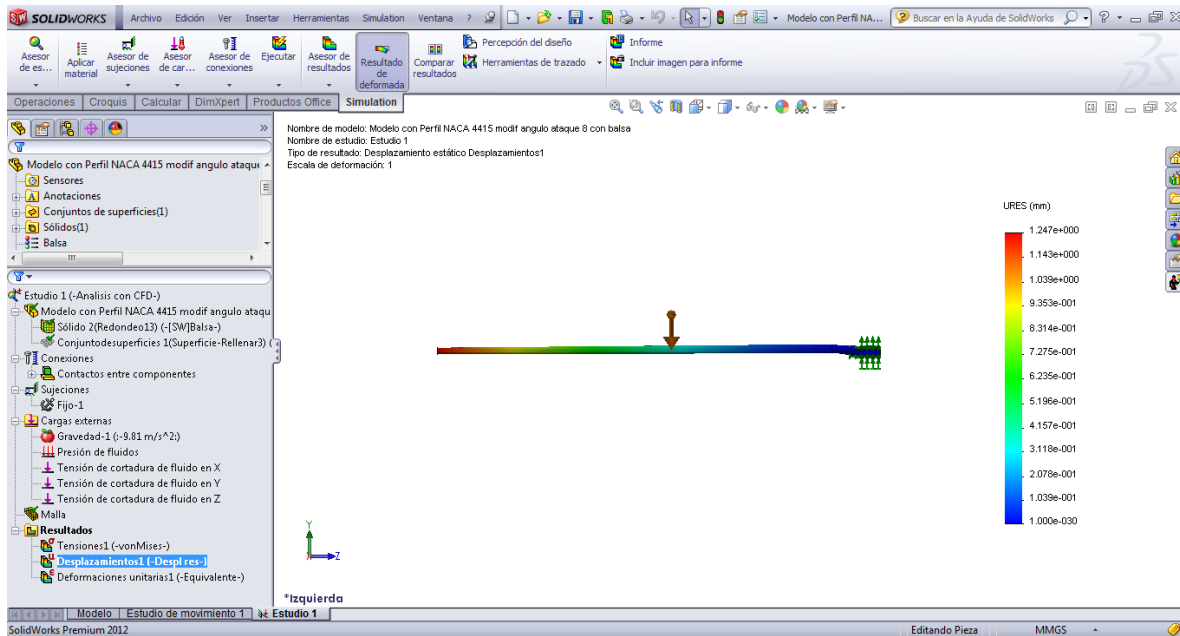


Figura 182. Escala real de desplazamientos

Se puede reproducir una animación del comportamiento del modelo con las cargas aplicadas. Para ello se hace clic derecho en los resultados actualmente seleccionados, y luego clic en **Animar** (Figura 183.).

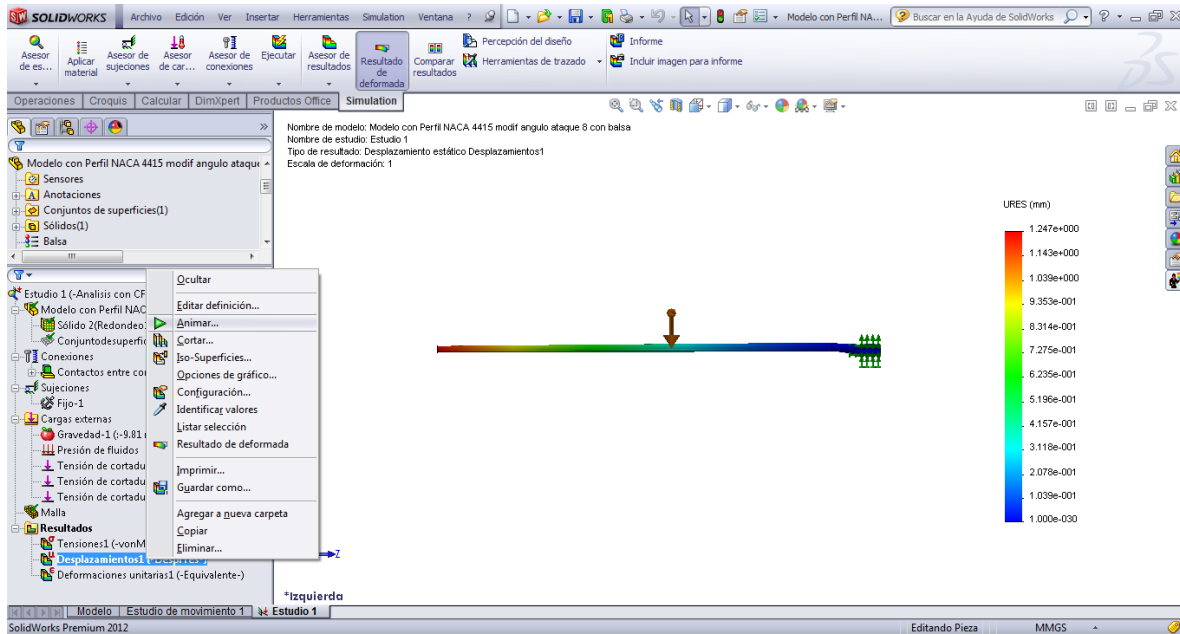


Figura 183. Ejecutar animación

Se observará como el modelo se deforma y vuelve a su posición original repetidamente (Figura 184.).

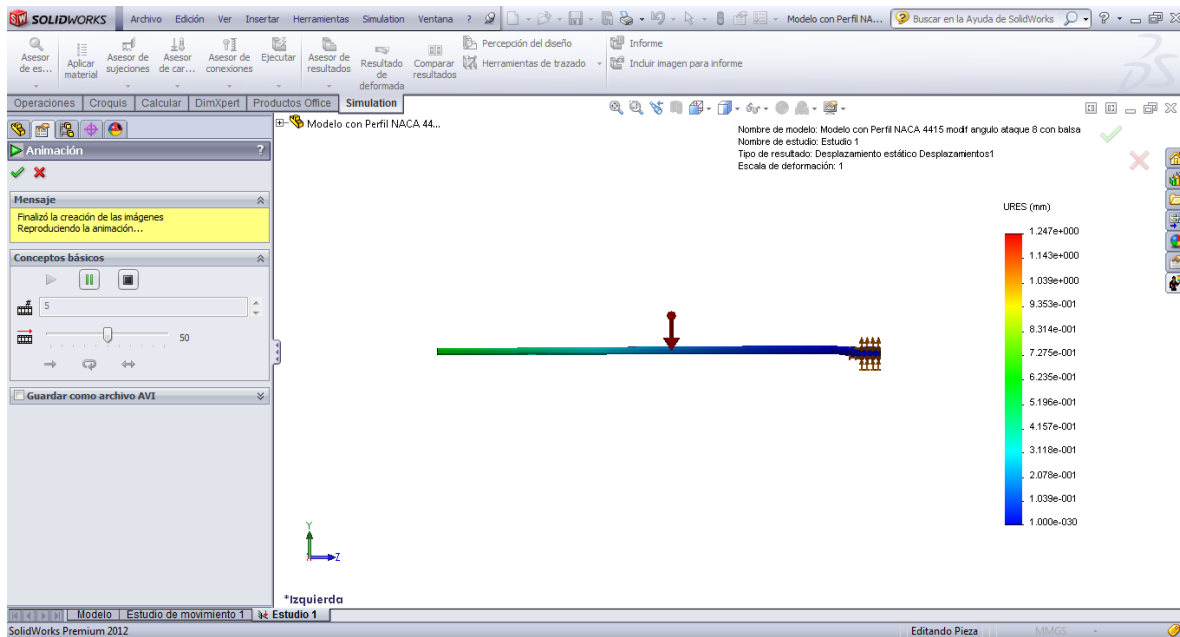


Figura 184. Ejecutar animación

Al igual que en el análisis con **Flow Simulation**, en el análisis estático se puede generar un informe con todos los datos, para esto se hace clic en **Informe (Figura 185.)**.

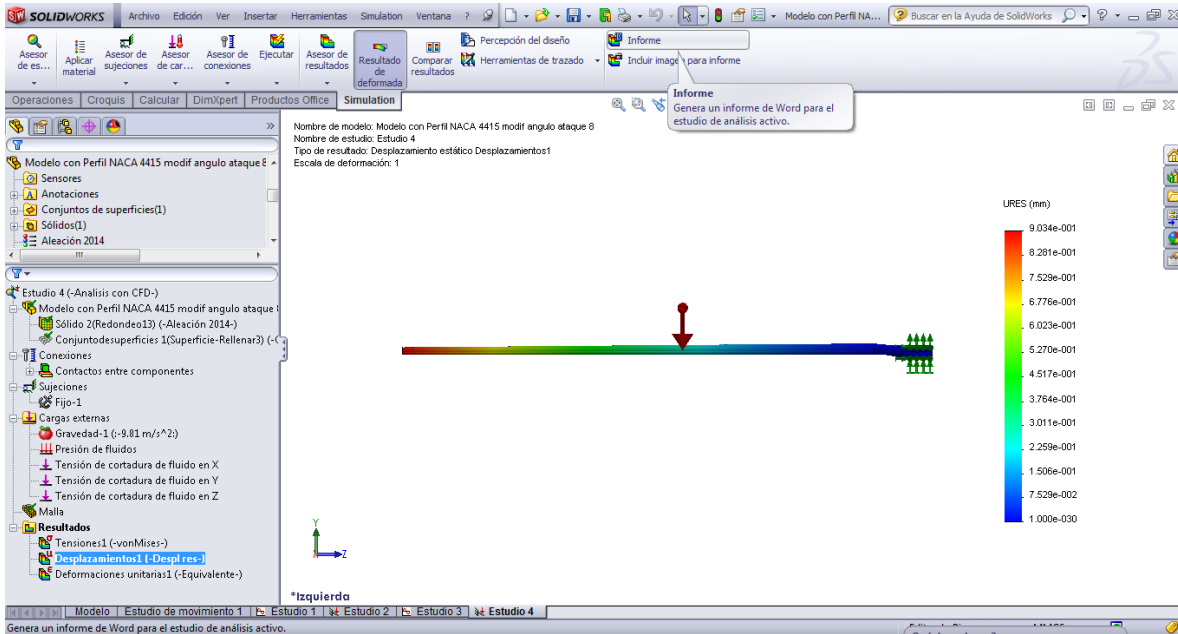


Figura 185. Generar Informe de resultados

Aparecerá una ventana con las **Opciones del Informe**, se deja los ajustes por defecto, y clic en **Publicar (Figura 186.)**.

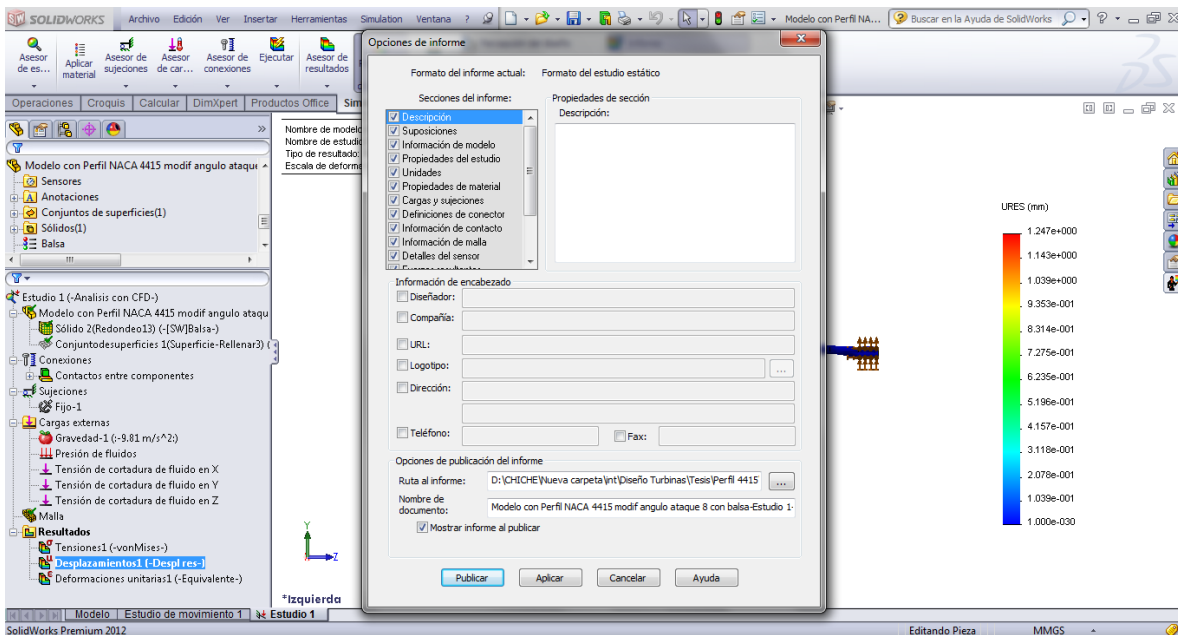


Figura 186. Generar informe de resultados

Aparecerá una ventana mostrando el progreso de generación del informe (**Figura 187.**).

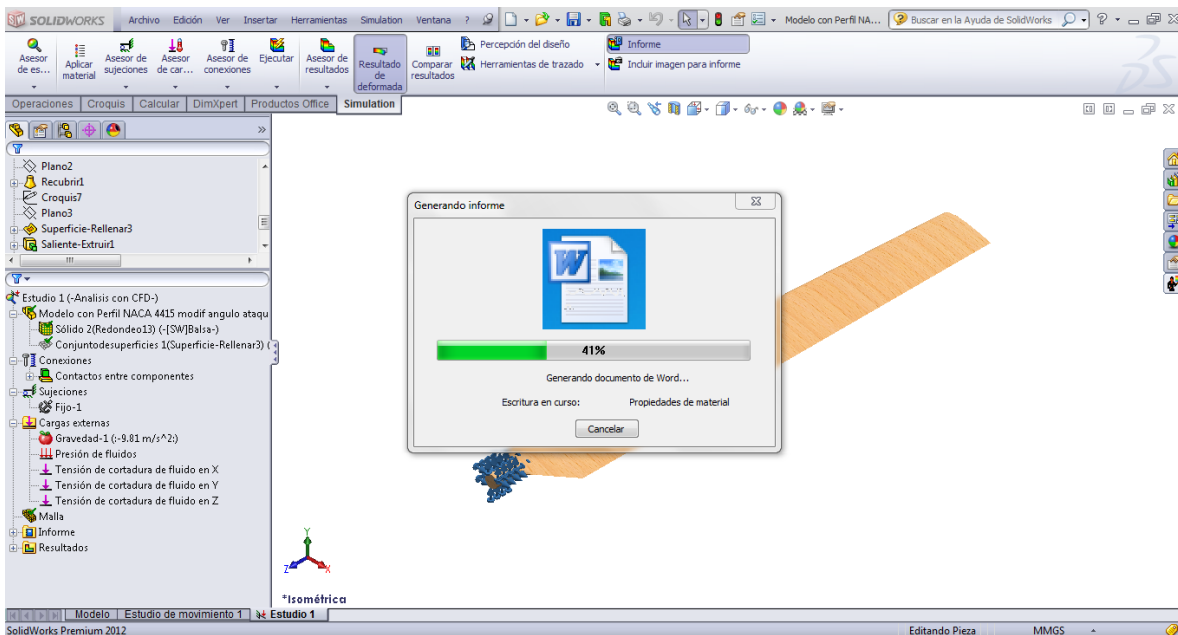


Figura 187. Proceso de generación de informe de resultados

Al final se abrirá un documento de Word con el informe del análisis estático (**Figura 188.**).

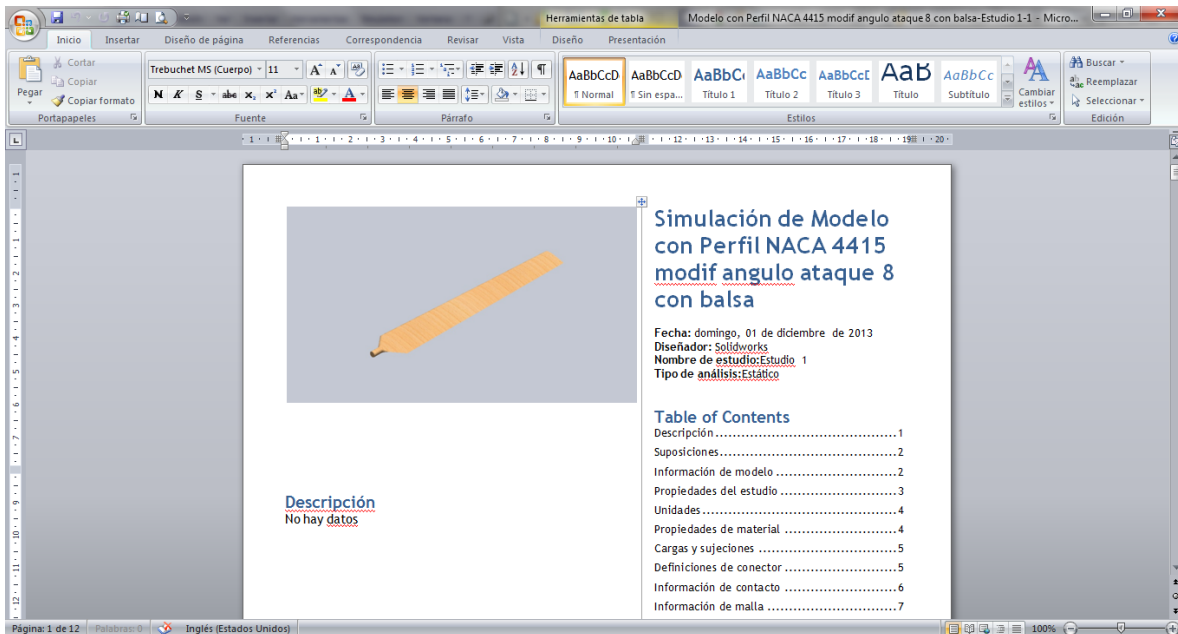


Figura 188. Informe de resultados

El dato más importante de este análisis es comparar el máximo valor de tensión que se genera en el modelo y compararlo con el valor de tensión del límite elástico, en este caso el



valor máximo de tensión experimentado por el modelo es de 7.6 MPa, mientras que el valor límite es de 96.9 MPa.

## 4.2. Análisis de Fatiga

El análisis de fatiga se lo realiza en base a los resultados del análisis estático, así que luego de concluir el primero, se hace clic en **Asesor de estudios/Nuevo estudio (Figura 189.)**.

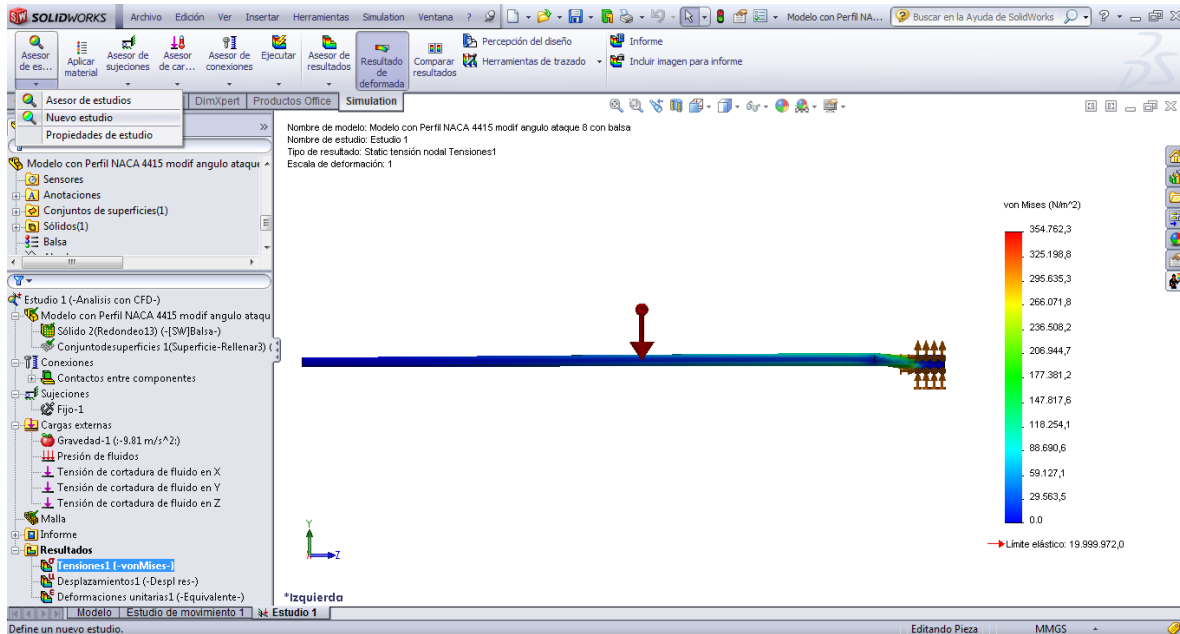


Figura 189. Nuevo Estudio

Se elige **Fatiga** y luego clic en **Aceptar (Figura 190.)**.

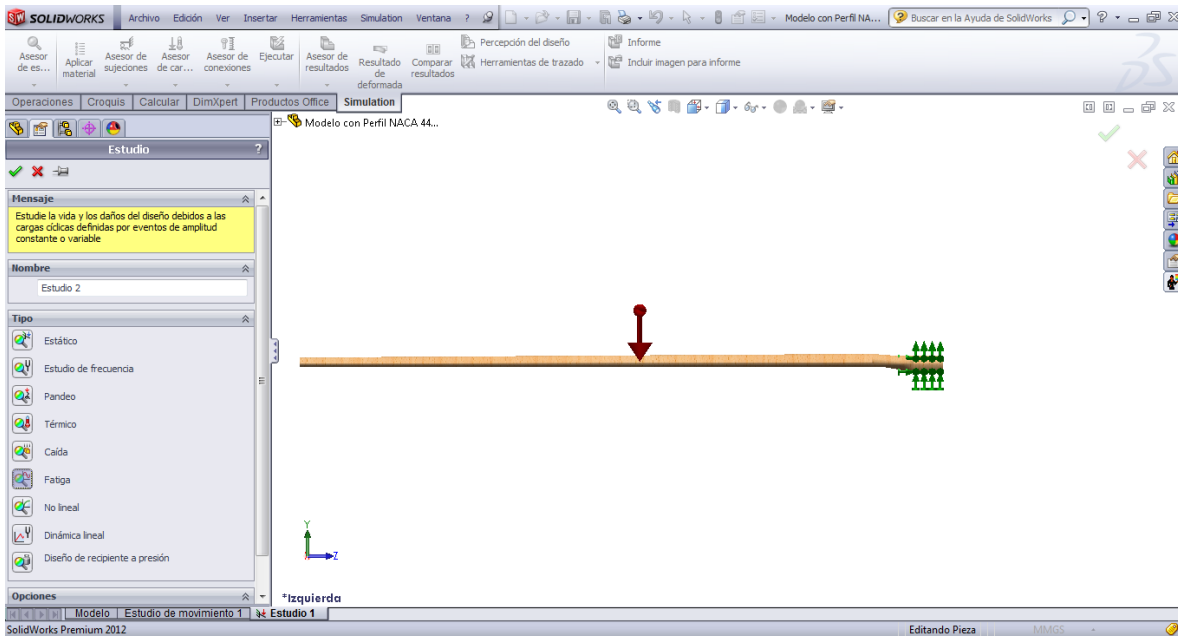


Figura 190. Estudio de Fatiga

Aparecerá un árbol de análisis en la parte derecha, se hace clic derecho en **Carga**, y luego en **Agregar suceso (Figura 191).**

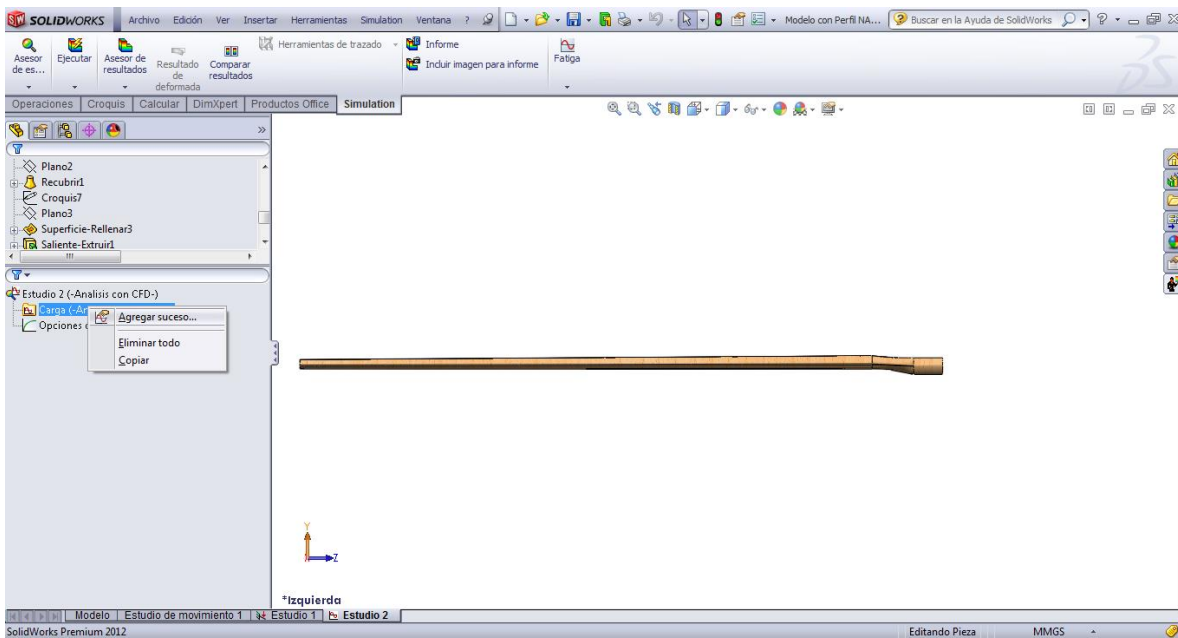


Figura 191. Agregar carga

Aparecerá una ventana de configuración de suceso, se deja los valores por defecto y luego se hace clic en **Aceptar (Figura 192).**

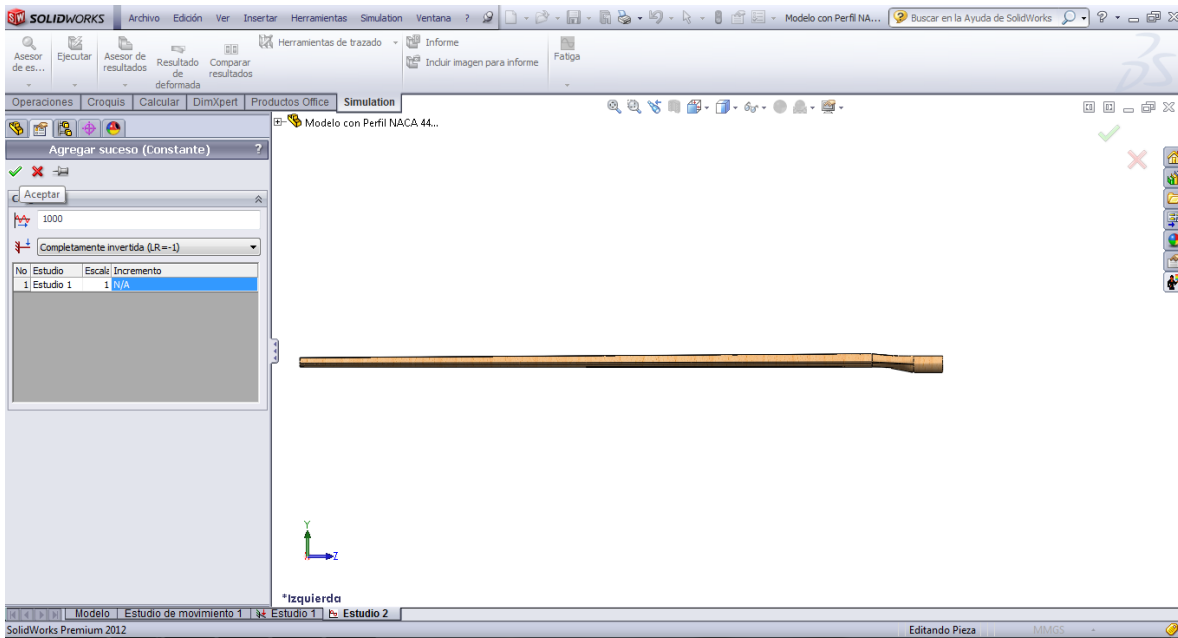


Figura 192. Agregar carga

Lo siguiente es aplicar datos de fatiga al modelo, para esto en el árbol de análisis, en la parte del modelo, se hace clic derecho y luego clic en **Aplicar datos de fatiga a todos los sólidos (Figura 193).**

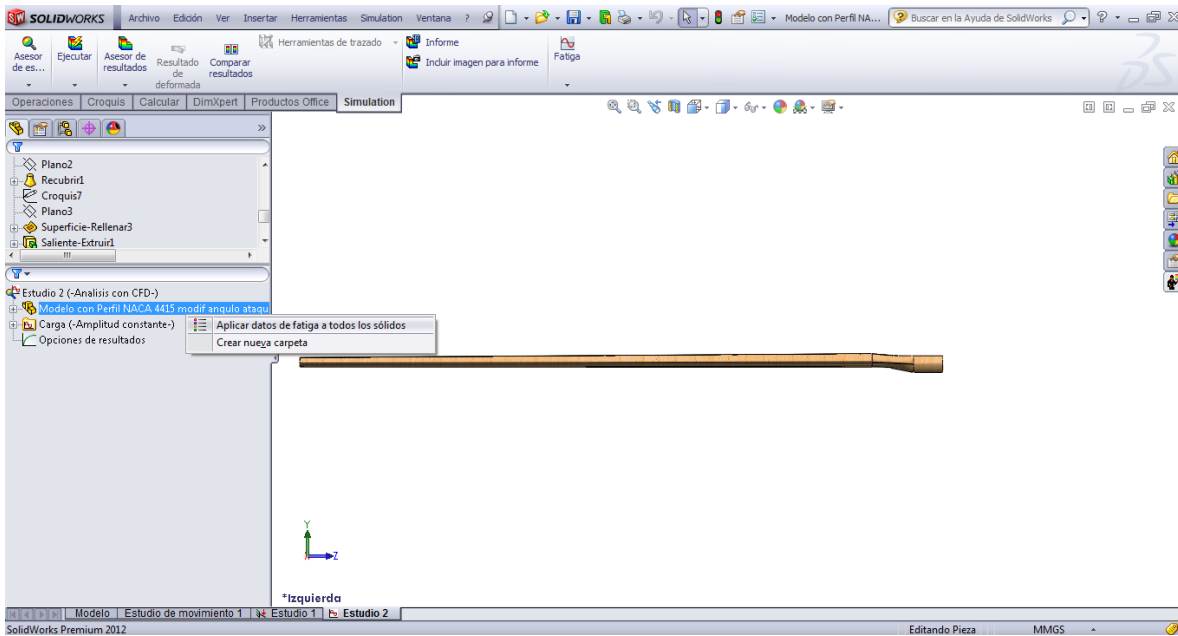


Figura 193. Aplicar datos de fatiga

Aparecerá una ventana correspondiente al **Material**, en la pestaña de **Curvas SN de fatiga** (Curvas Tensión alterna (S) en función del número de ciclos (N)), se hace clic en **Derivar de módulo elástico del material**. Luego clic en **Aplicar** y **Cerrar** (Figura 194.).

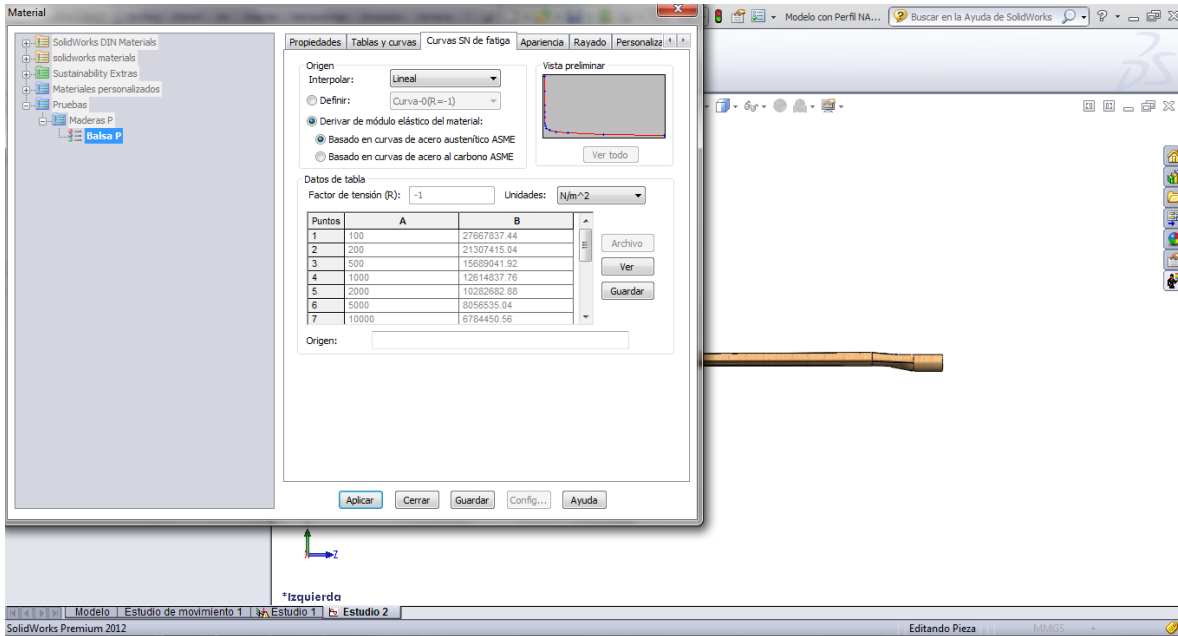


Figura 194. Curvas SN de fatiga

Lo siguiente es definir las opciones de resultados, se hace clic derecho sobre **Opciones de resultados**, y luego en **Definir/Editar** (Figura 195.).

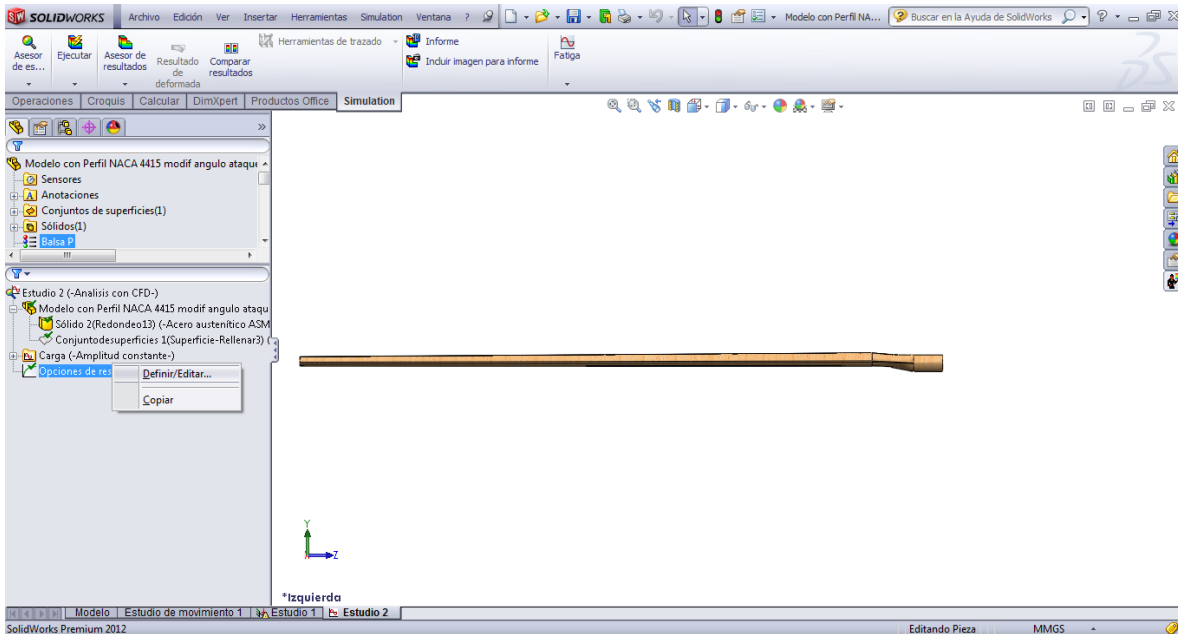


Figura 195. Definir opciones de resultados

Se verifica que este marcada la opción de **Todo el modelo**, y luego clic en **Aceptar** (Figura 196.).

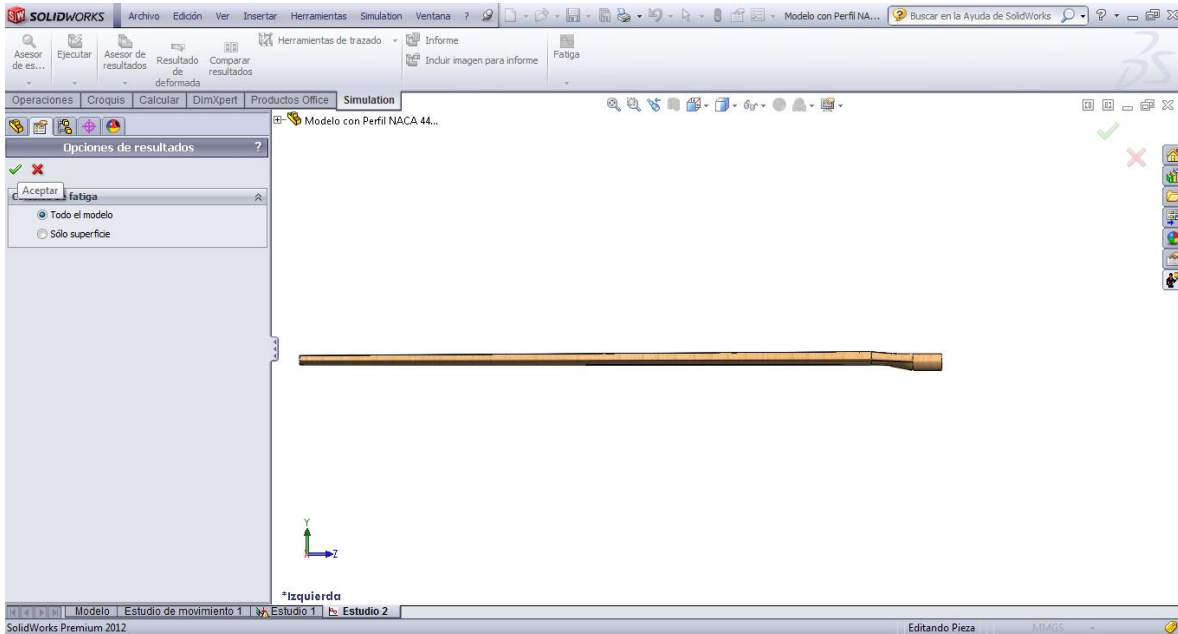


Figura 196. Definir opciones de resultados

El paso final es ejecutar el análisis, para esto clic en **Ejecutar** (Figura 197.).

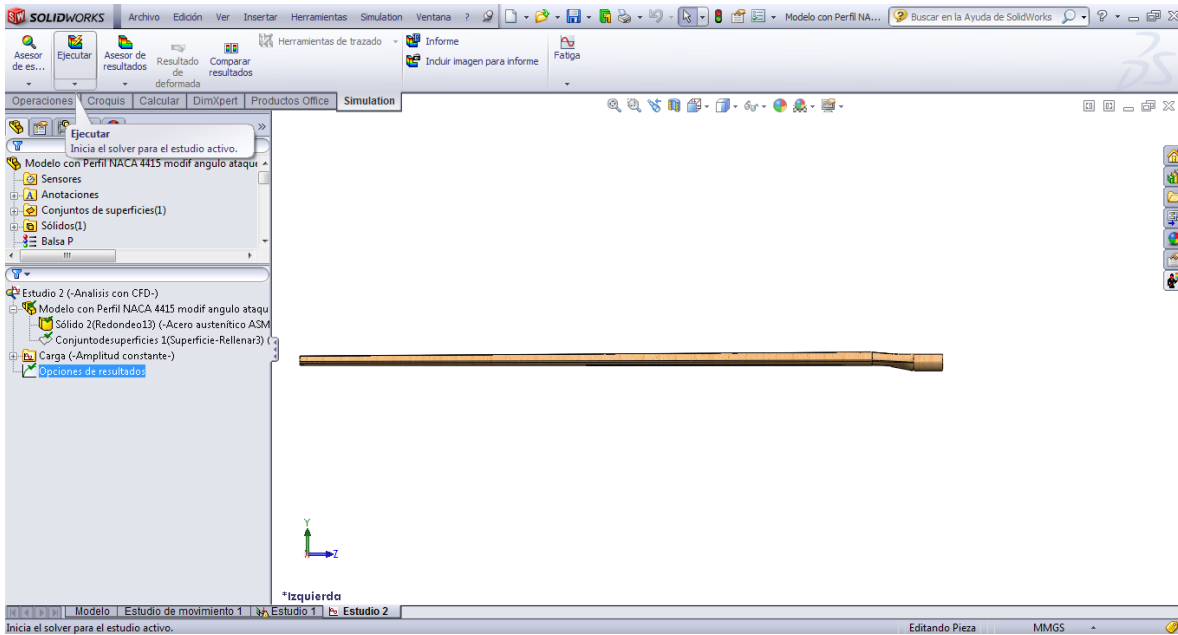


Figura 197. Ejecutar análisis

Al finalizar el proceso de resolución, se mostrarán los resultados de **Daño** y **Vida** del modelo (**Figura 198**).

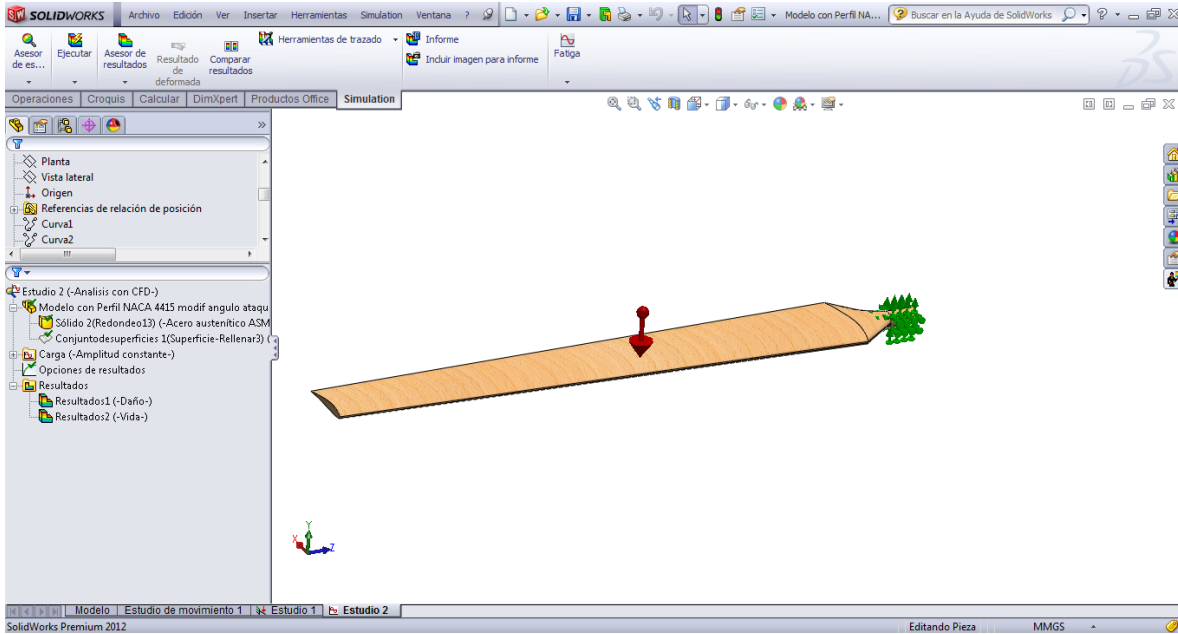


Figura 198. Resultados de análisis

Para visualizar los resultados, clic derecho sobre uno de ellos y luego en **Mostrar** (**Figura 199**).

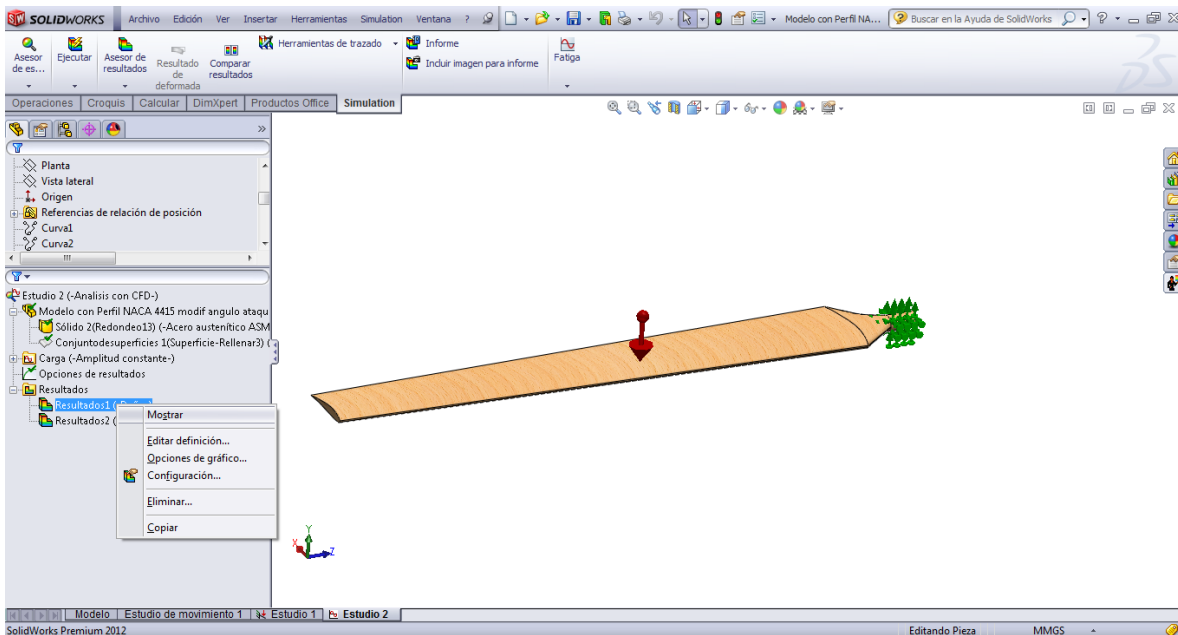


Figura 199. Mostrar resultados

El porcentaje de los resultados de daño será el automático (Figura 200.).

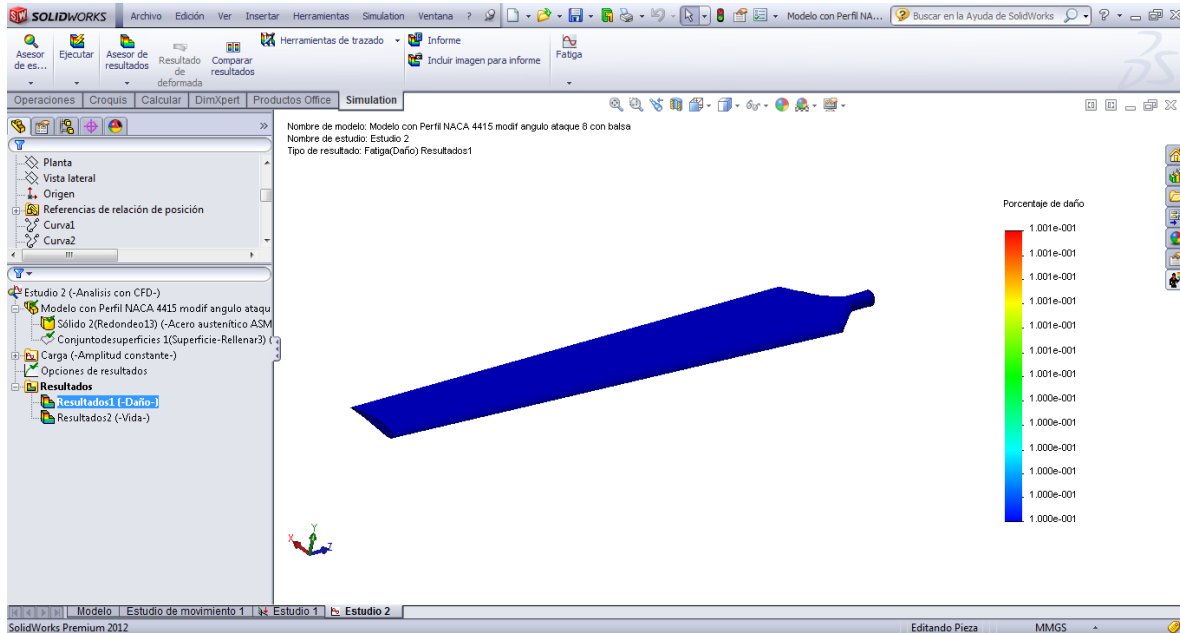


Figura 200. Mostrar resultados

Para cambiar el rango de valores del porcentaje de daño, se hace clic derecho en los Resultados de daño, luego clic en Opciones de gráfico (Figura 201.).

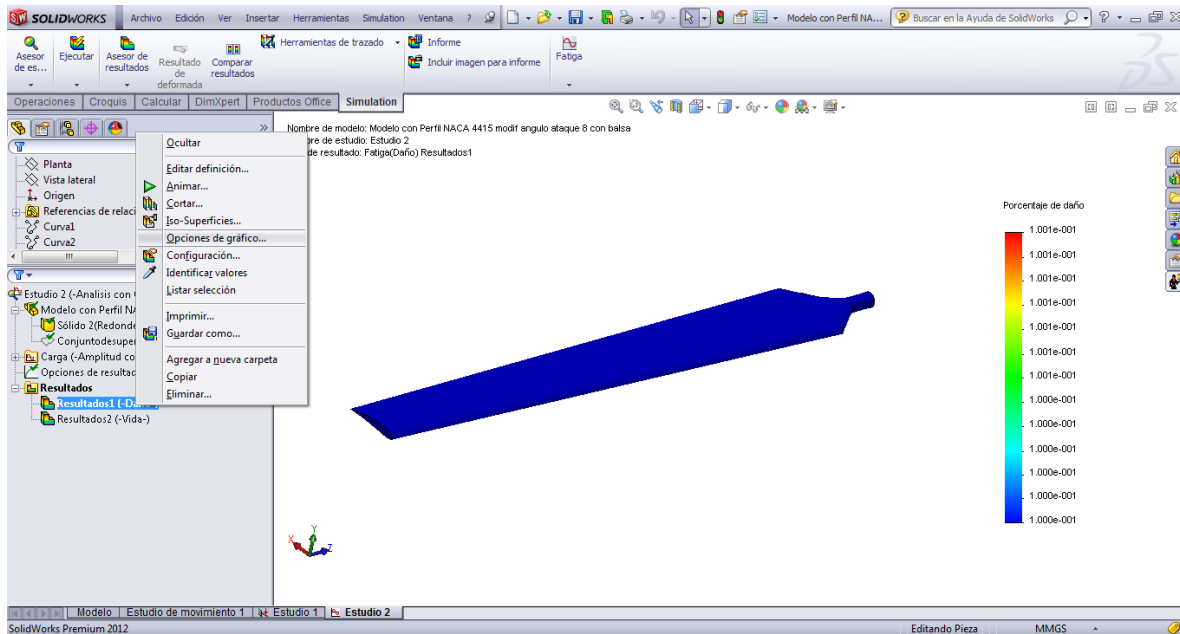


Figura 201. Editar opciones de gráfico

Se hace clic en **Definido**, se ingresan los valores de 0 como mínimo y 100 como máximo (Figura 202.).

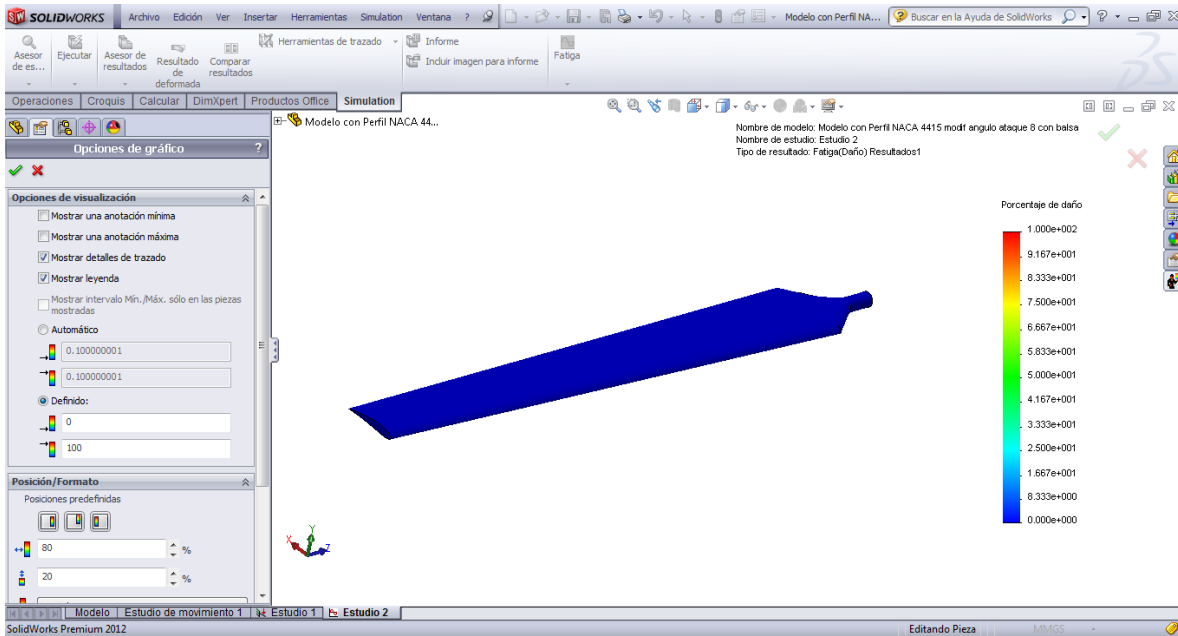


Figura 202. Editar opciones de gráfico

Se mostrará en una escala de 0 a 100 el porcentaje de daño (Figura 203.).

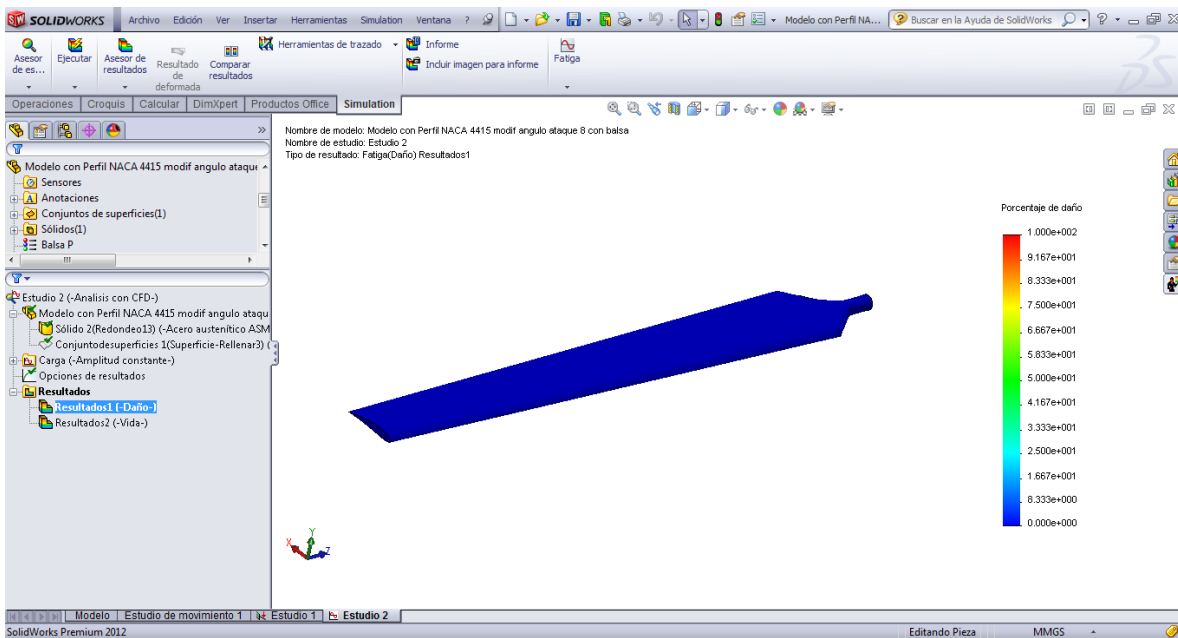


Figura 203. Editar opciones de gráfico



Para mostrar los **Resultados de Vida**, se hace clic derecho en los mismos y luego en **Mostrar** (Figura 204.).

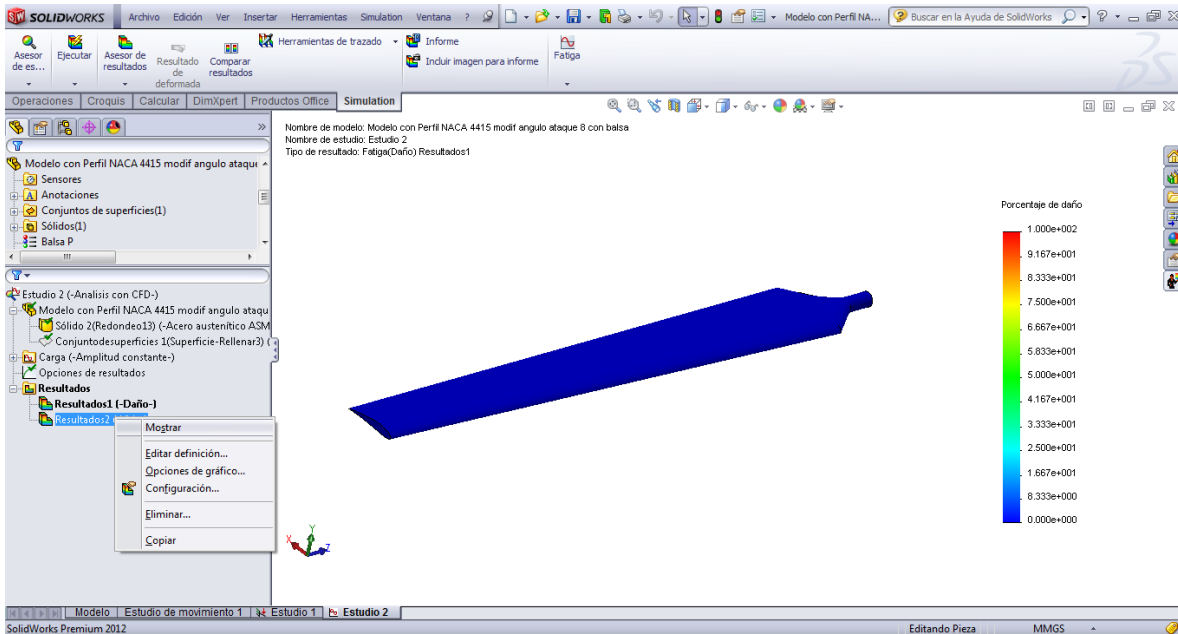


Figura 204. Mostrar resultados

Aparecerán los resultados de **Vida Total** en ciclos, y el rango de valores de vida será el automático, para esto se procede de manera análoga al cambio de valores en los **Resultados de daño** (Figura 205.).

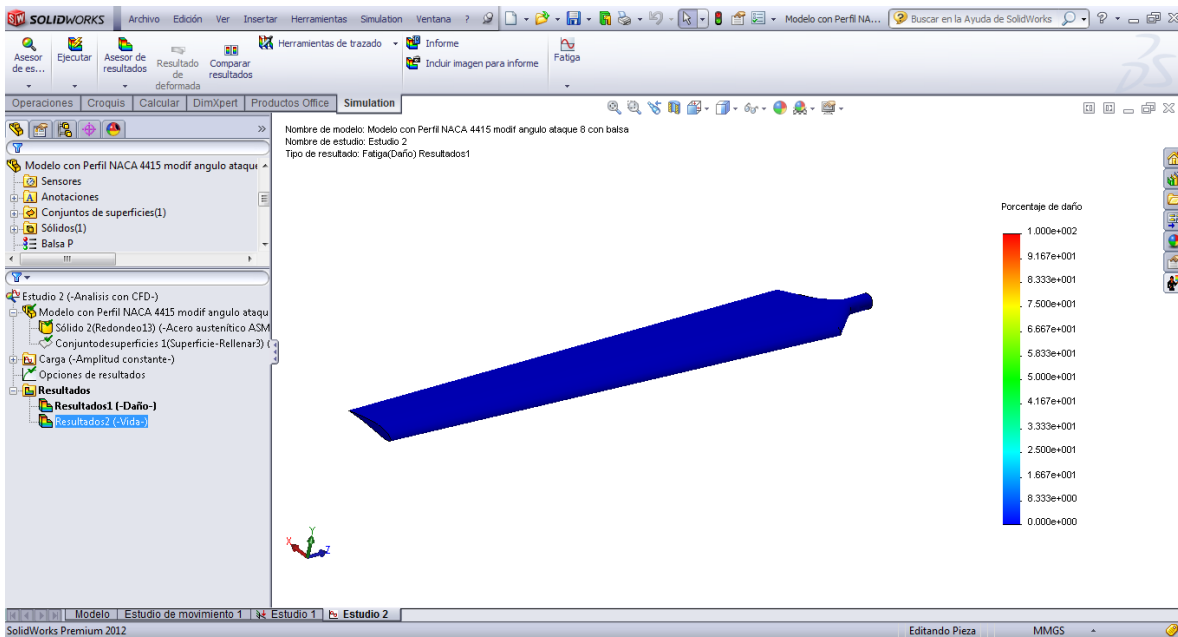


Figura 205. Mostrar resultados

Al final se tendrá en una escala de 0 a 100% la vida total del modelo (**Figura 206.**).

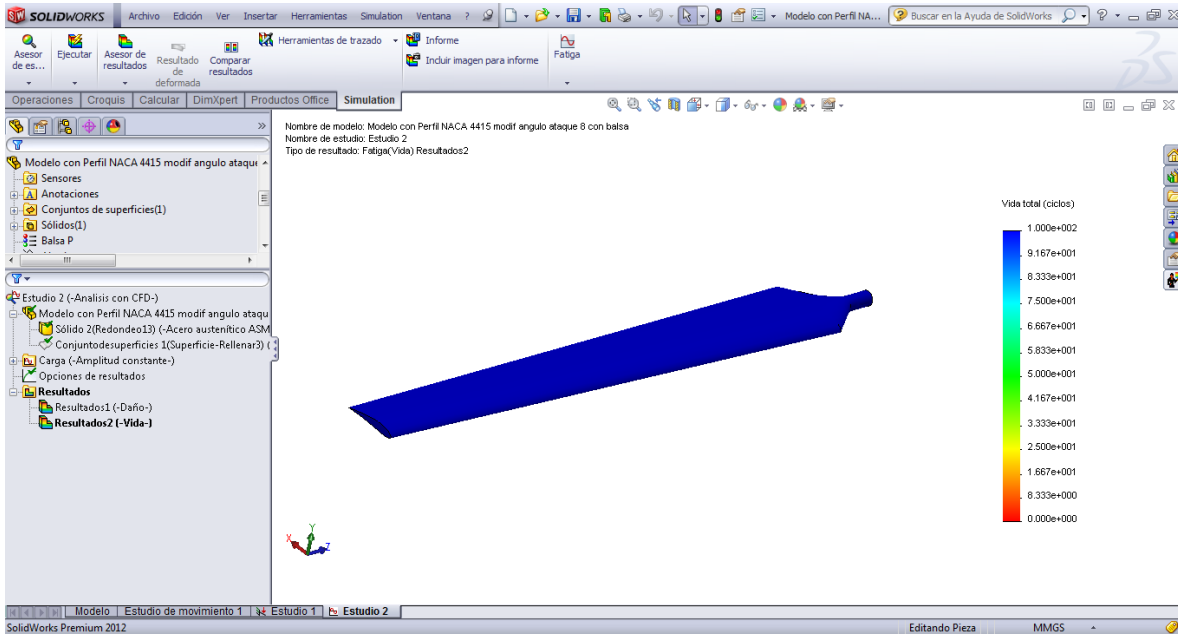


Figura 206. Mostrar resultados

De la misma forma que se generó el informe para el análisis estático se generará el informe para el análisis de fatiga (**Figura 207.**).

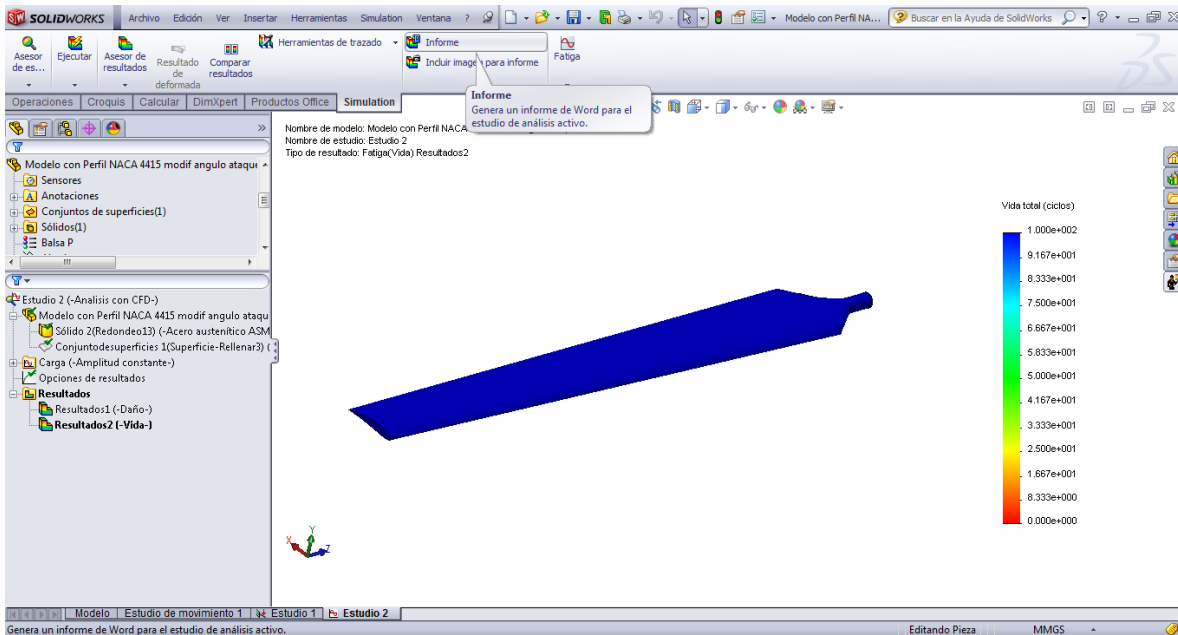


Figura 207. Generación de informe de resultados

Al final se generará el documento de Word con la información de este último análisis (Figura 208).

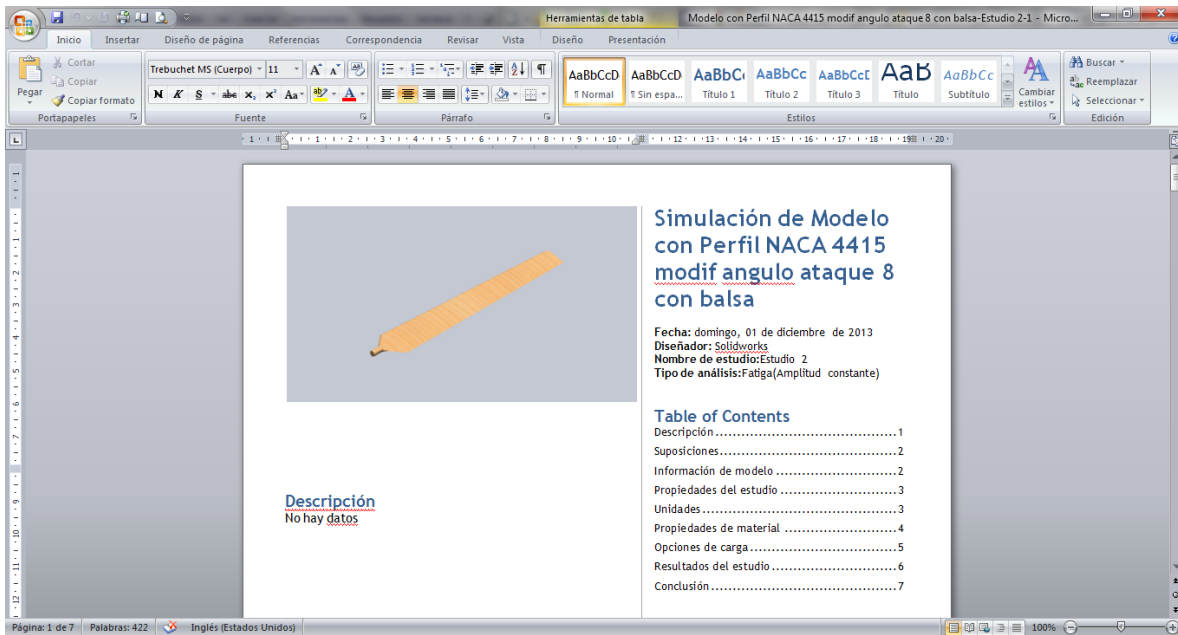


Figura 208. Informe de resultados

La simulación de fatiga realizada con 1000 ciclos, y en cuanto al porcentaje de daño y vida del modelo, se muestra que cumple con estos requerimientos.

## 5. SIMULACIÓN DEL MECANIZADO DEL MODELO Y GENERACIÓN DEL PROGRAMA CNC (CAM-SolidCAM)

Para simular las operaciones de mecanizado y así obtener el modelo de la pala se utilizó un software CAM, en concreto el complemento de SolidWorks, SolidCAM, el cual a su vez también permite obtener el programa CNC que se utiliza en la Fresadora.

1. Primeramente se debe generar un prisma rectangular que contenga al modelo, este solido hará referencia al material en bruto o la materia prima en la cual se mecanizará el modelo. Se selecciona el plano de **Planta**, luego clic en **Croquis** (Figura 209).

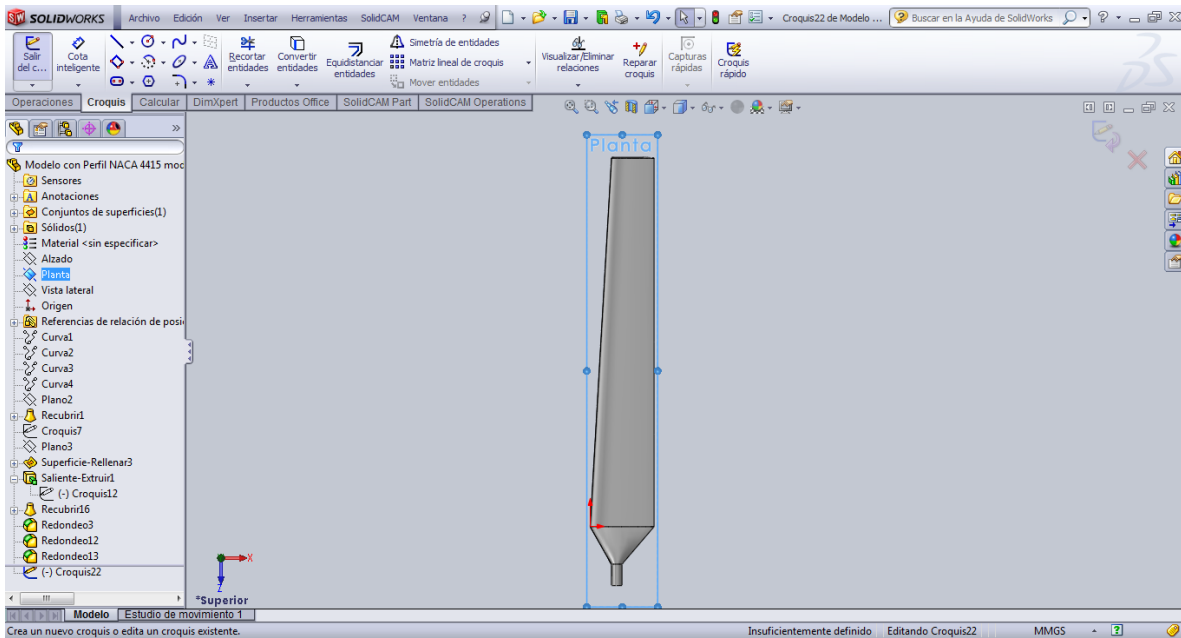


Figura 209. Creación del prisma que hace referencia al material en bruto.

Se hace clic en **rectángulo 3 puntos de esquina**, y se crea el rectángulo, procurando que el modelo quede dentro del perímetro del rectángulo (**Figura 210.**).

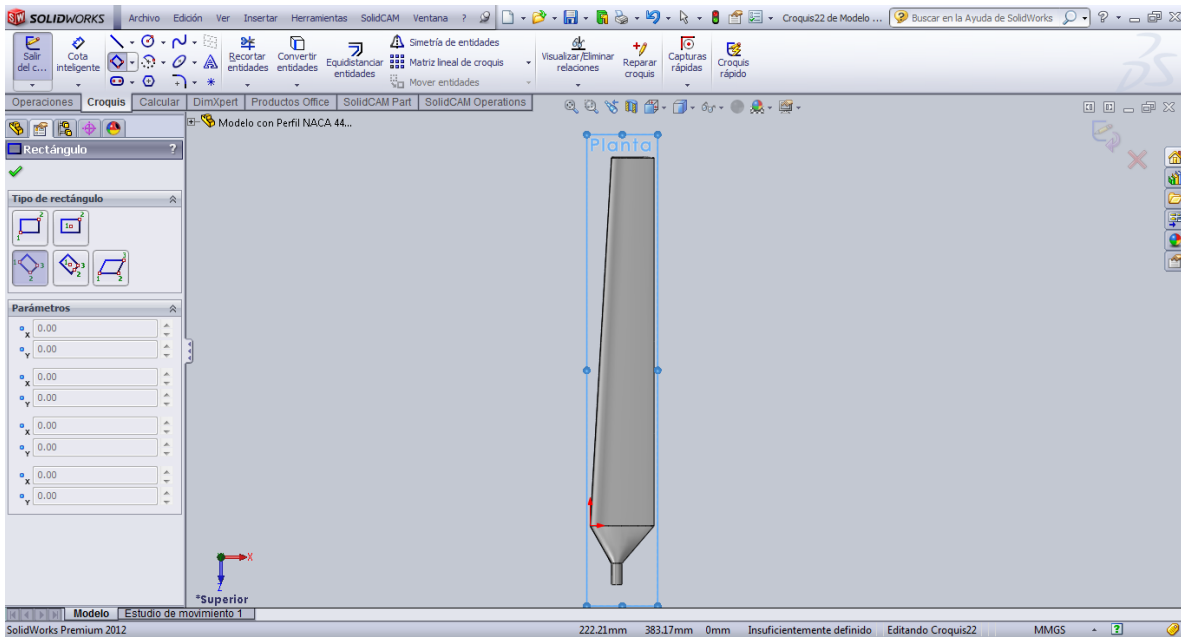


Figura 210. Creación de un rectángulo.

Seguidamente se acota los lados del rectángulo para aumentar la exactitud (**Figura 211.**).

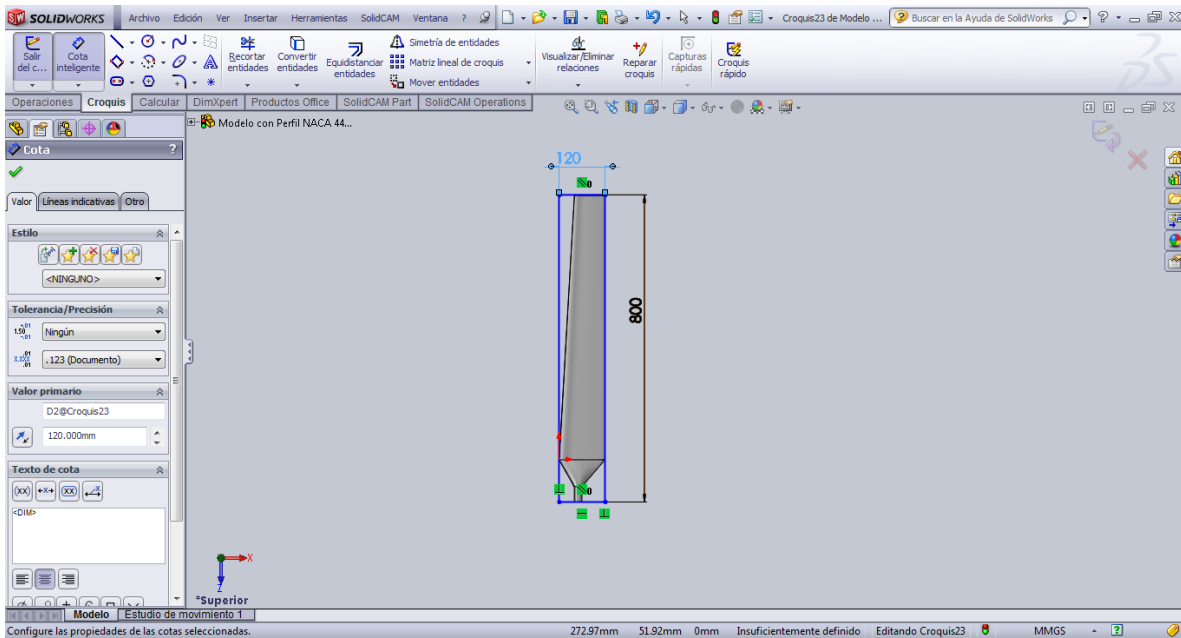


Figura 211. Dimensionamiento del rectángulo

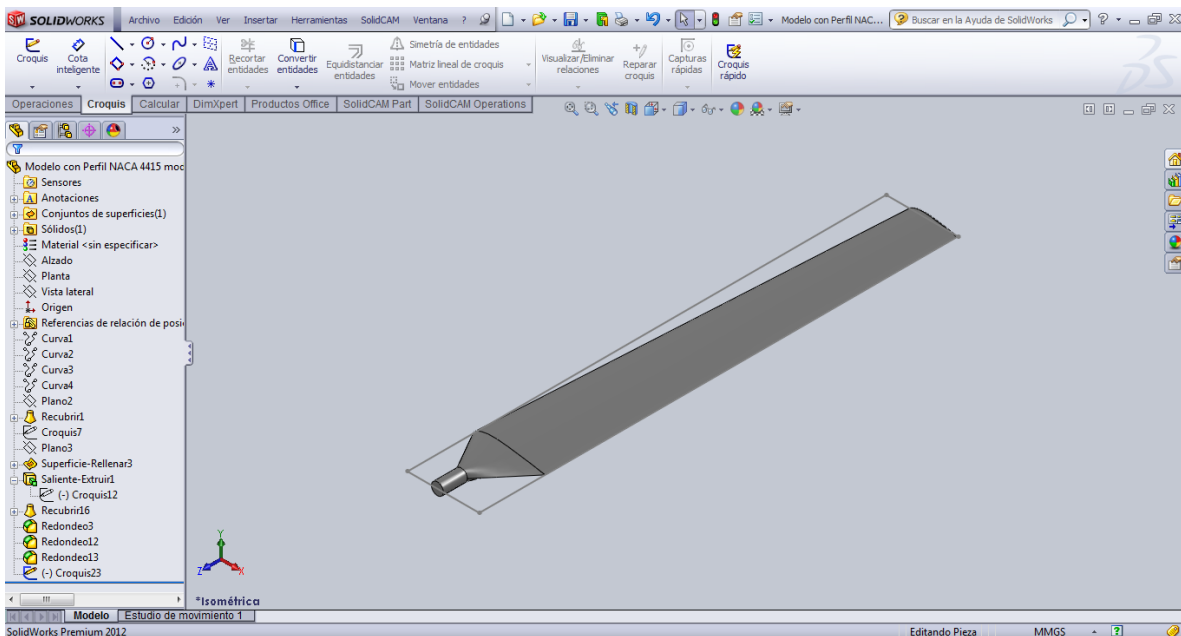


Figura 212. Rectángulo creado.

Lo siguiente es generar una operación de **extrusión** en base al rectángulo creado, se hace clic en la pestaña de **Operaciones/Extruir saliente/base**. Se introducen las dimensiones para las dos direcciones, en este caso los 800mm correspondientes a la longitud total de la pala y los 120mm correspondientes a la cuerda en la raíz de la pala, se quita el visto en la parte de **Fusionar resultado**, clic en **Aceptar**. (Figura 213).

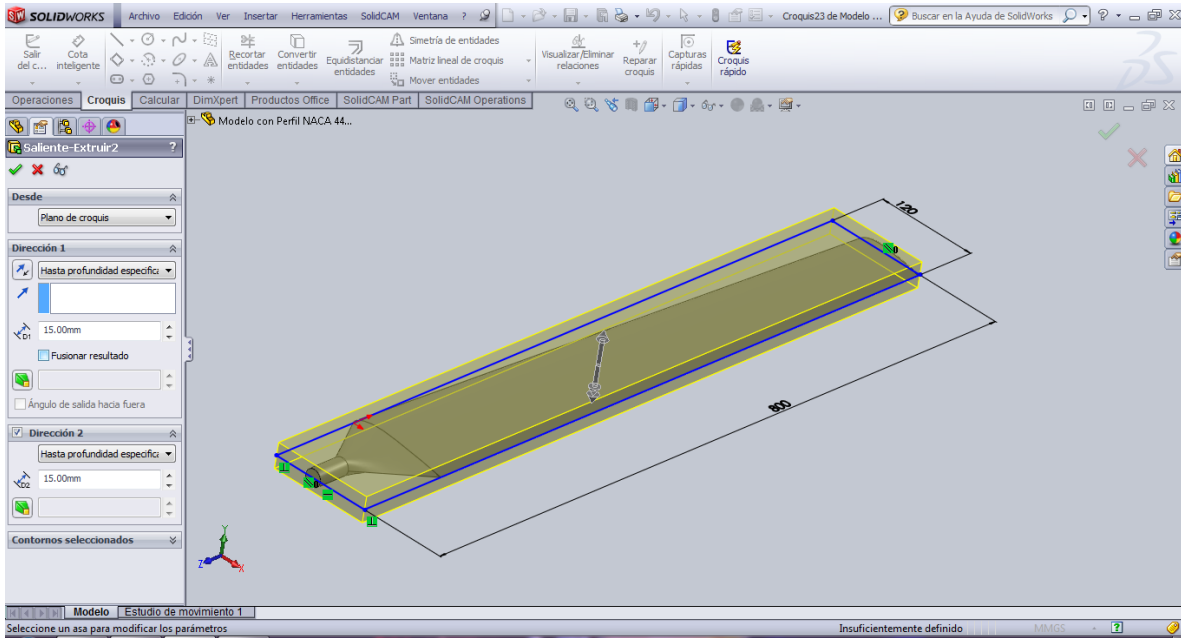


Figura 213. Extrusión del rectángulo.

Se tendrá un prisma rectangular y el modelo de la pala (**Figura 214.**)

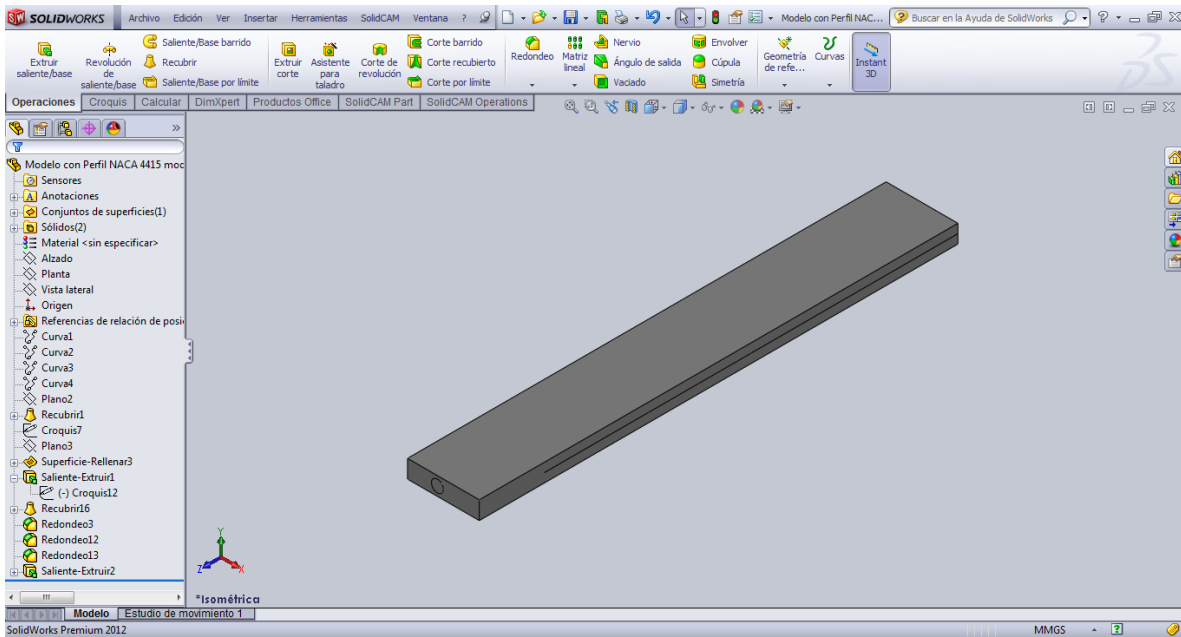


Figura 214. Prisma rectangular creado.

Para tener una mejor visualización, se cambia la transparencia del prisma, para esto en el **FeatureManager** ubicarse en la operación de **extrusión**, clic derecho y clic en **Cambiar transparencia** (**Figura 215.**)

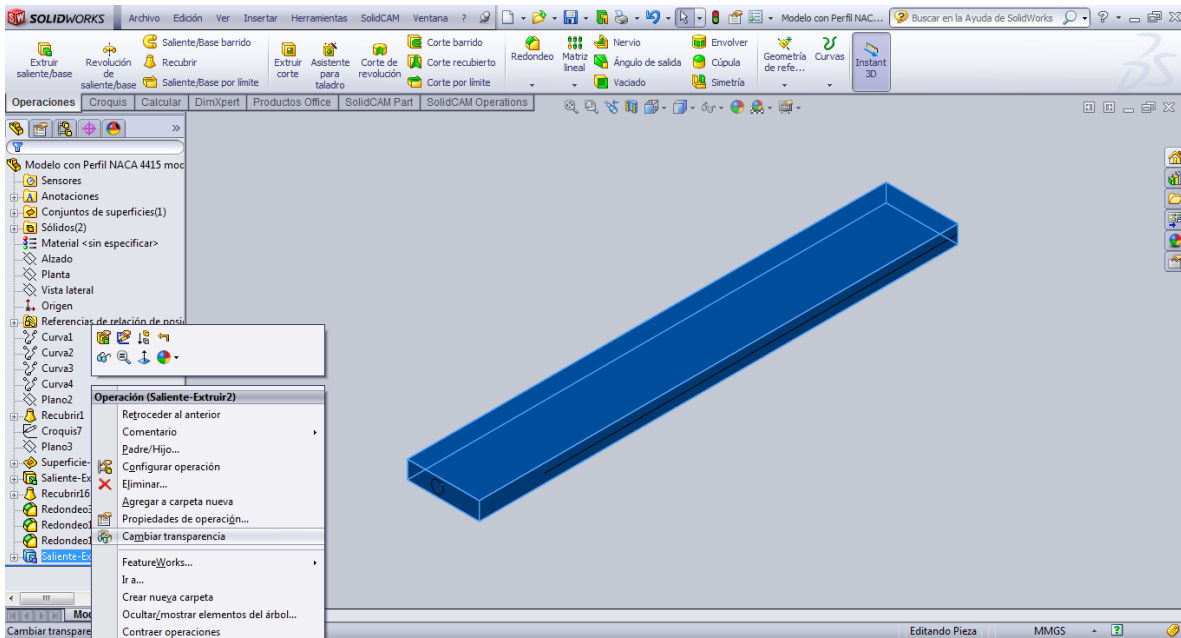


Figura 215. Cambio de transparencia del prisma.

Se podrá apreciar más fácilmente a los dos sólidos (**Figura 216.**).

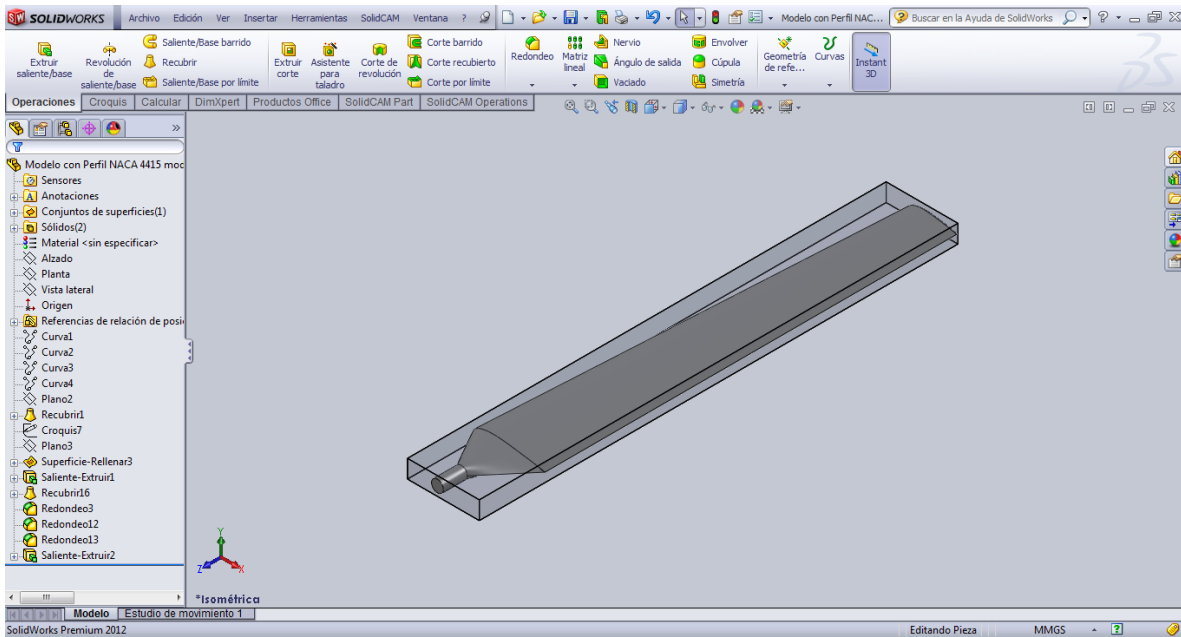


Figura 216. Prisma rectangular y modelo de pala.

El mecanizado del modelo será desarrollado en dos partes, la primera comprende la parte superior del modelo y la segunda, la parte inferior.

- Para el mecanizado de la parte superior, primero se determina los parámetros de partida, para ello, se ubica la pestaña del complemento de **SolidCAM (SolidCAM Part)**, luego clic en **New/Milling (Figura 217.)**.

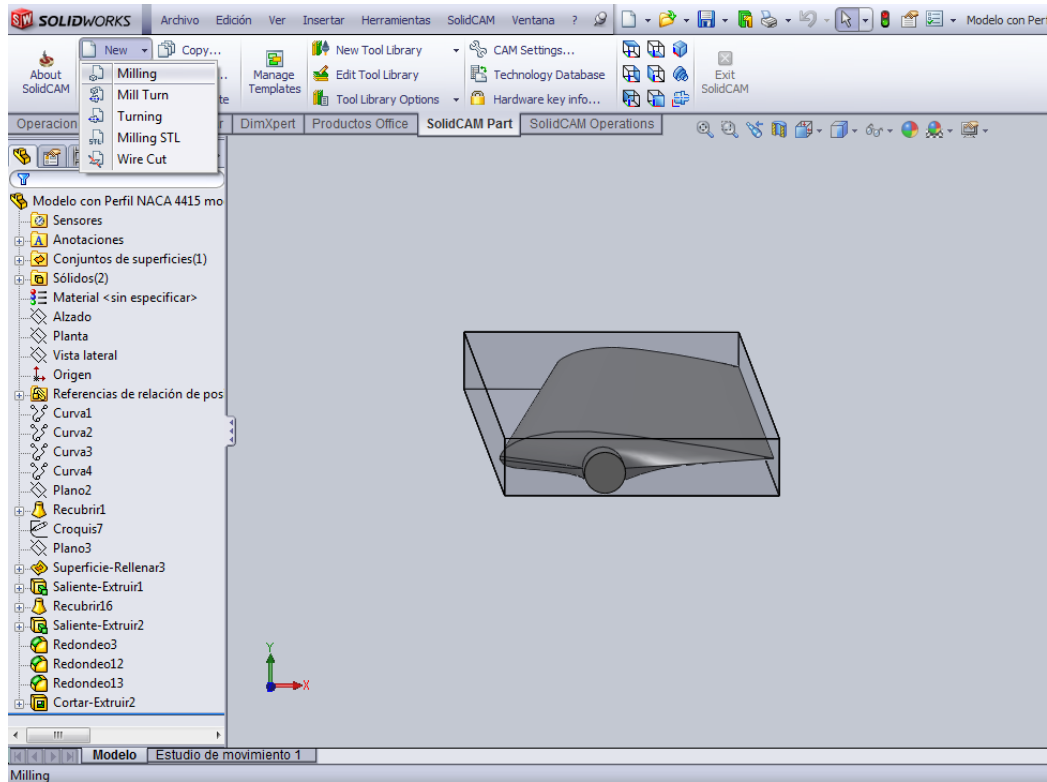


Figura 217. Definición de los parámetros de partida para las operaciones de mecanizado.

Aparecerá una ventana, en la cual se puede editar el nombre del archivo **SolidCAM**, por lo general, se hace clic en **Use model file directory**, para que el archivo se guarde en el mismo directorio en el que está el modelo de **SolidWorks**. También se podrá elegir el tipo de unidades, ya sean métricas o pulgadas(**Figura 218.**).



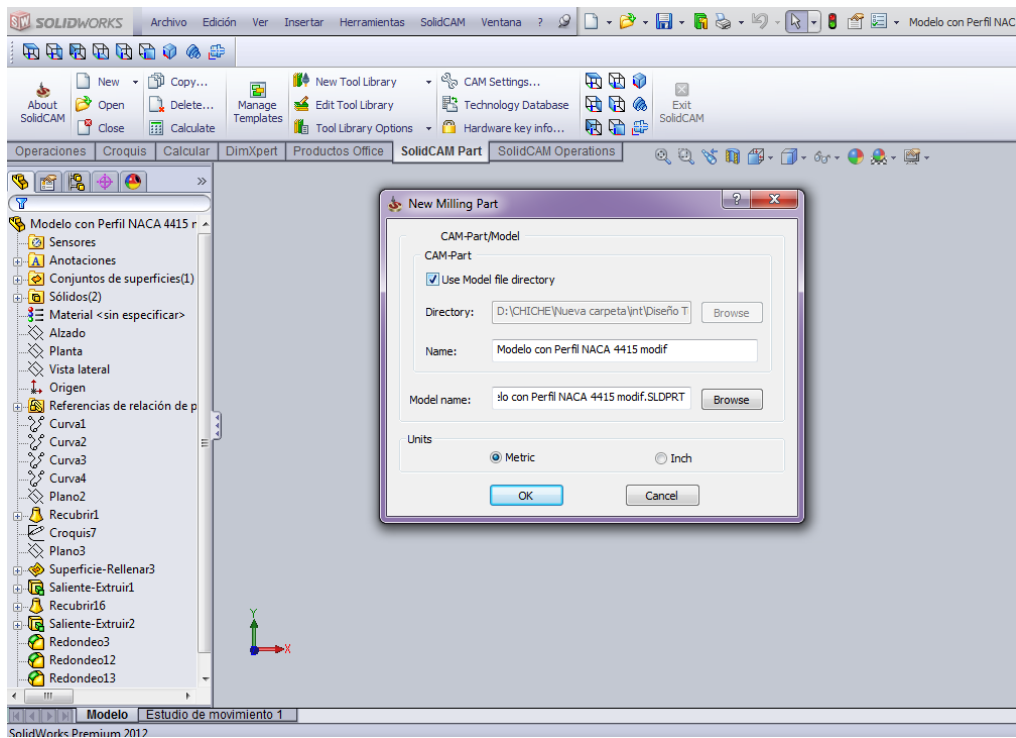


Figura 218. Creación del archivo para las operaciones de mecanizado.

A continuación, se hace clic en **OK**.

Aparecerá en la parte izquierda el **PropertyManager** de **SolidCAM**, en el cual se editará la máquina **CNC (CNC Machine)** a utilizar, en este campo se escogerá **FANUC**, la que se adapta más a las características de la **Fresadora Travis** con la que se mecanizará el modelo (**Figura 219**).

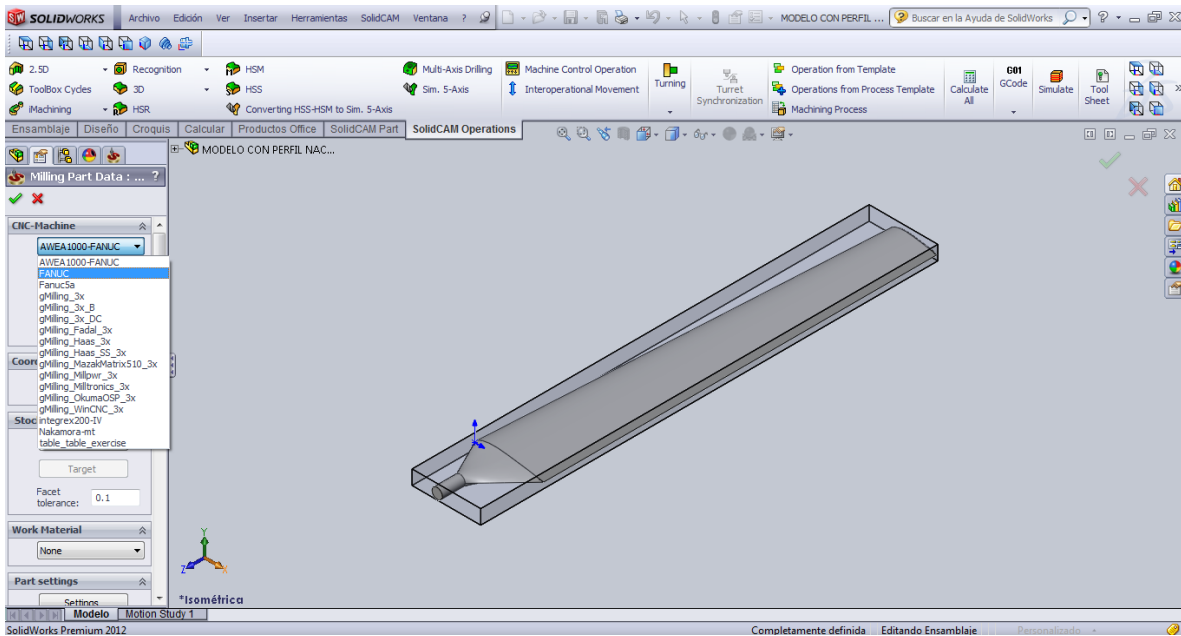


Figura 219. Selección de la máquina CNC.

Posteriormente se define el sistema de coordenadas, el cual hace referencia al cero pieza, es decir al punto desde el cual se determinan las diferentes posiciones y trayectorias para los movimientos de avance y mecanizado del equipo.

Para ello, se hace clic en **(Coordinate System) Define (Figura 220.)**.

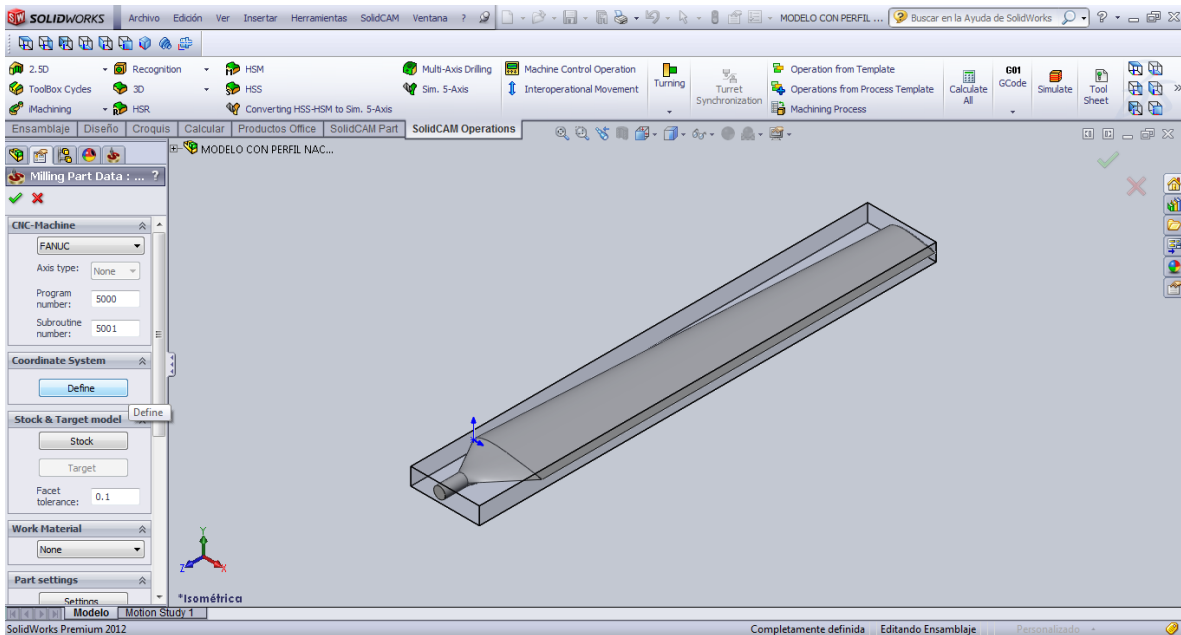


Figura 220. Definir sistema de coordenadas.

En la parte izquierda se mostrara el **PropertyManger**, se hace clic en **Define** nuevamente (**Figura 221.**).

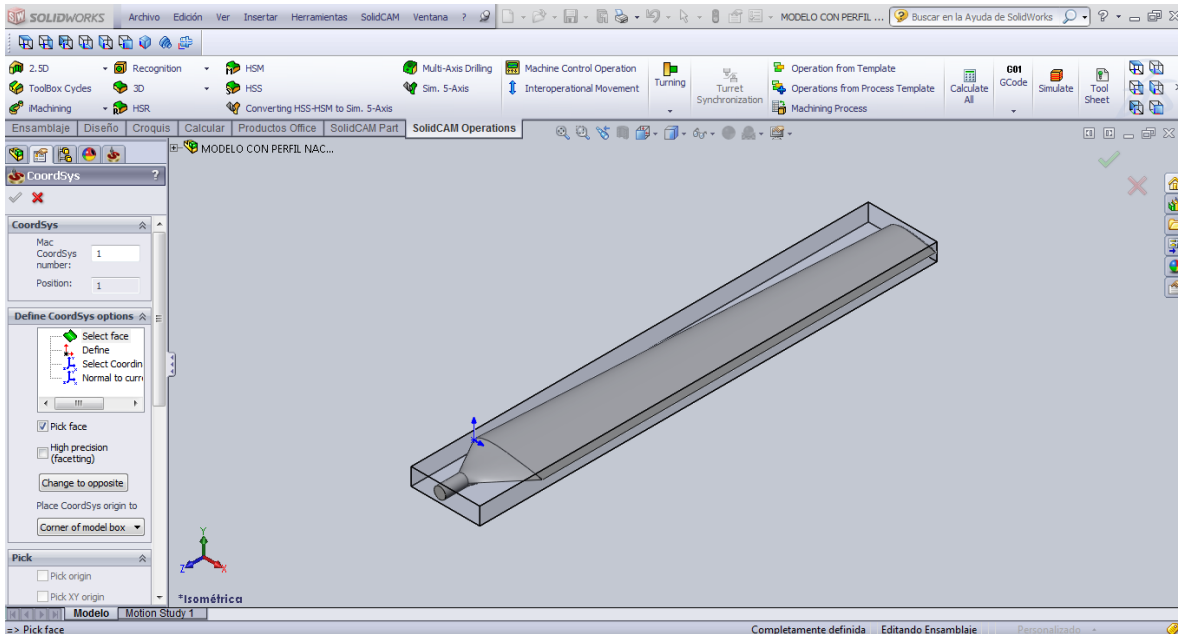


Figura 221. Definir Sistema de coordenadas.

Luego se deberá seleccionar el origen del sistema de coordenadas, para esto, se hace clic en un vértice cualquiera del prisma. (**Figura 222.**).

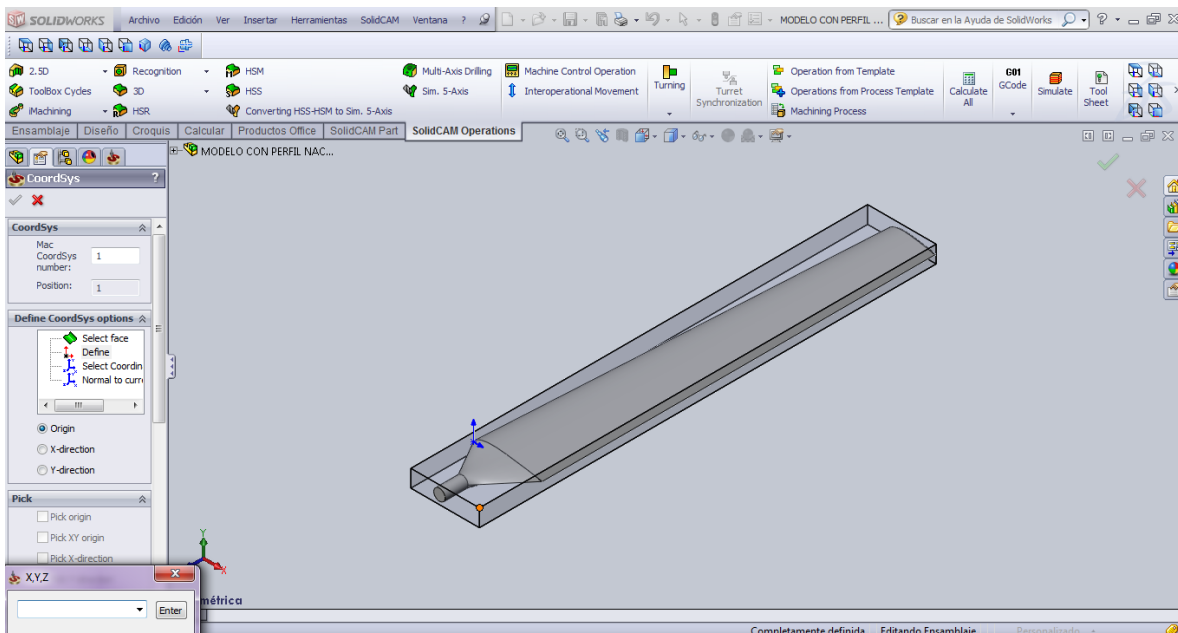


Figura 222. Definir Origen del sistema de coordenadas.

Después se define la dirección del eje X, para esto clic en una arista del prisma que pase por el punto del origen ya definido (**Figura 223.**).

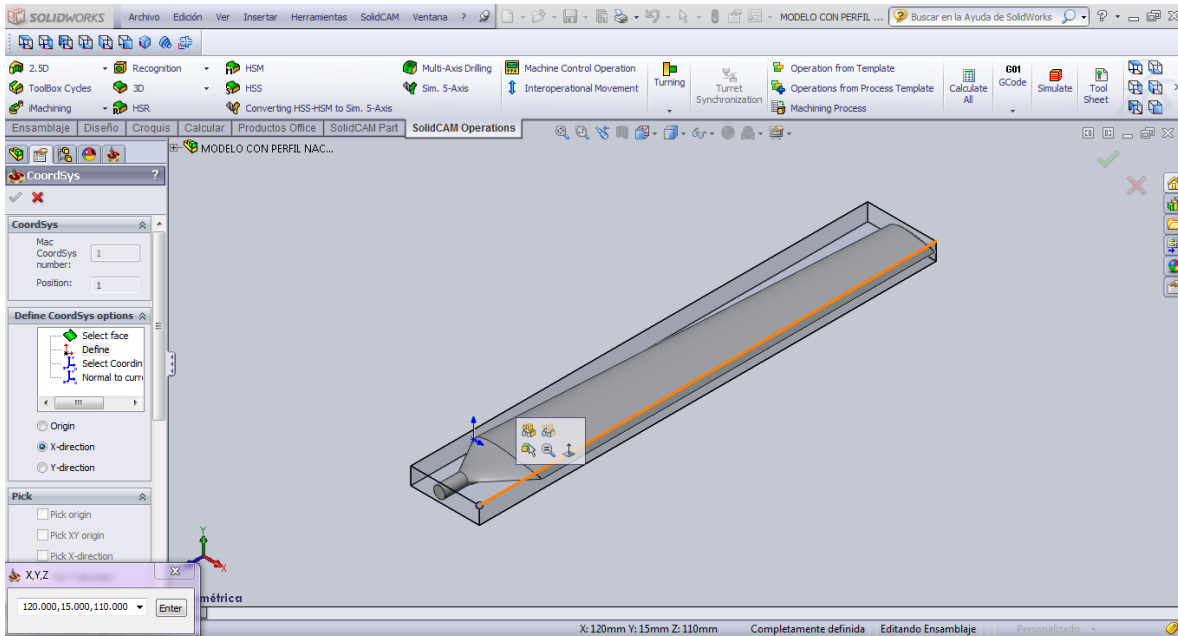


Figura 223. Definir dirección del eje X.

Aparecerá el eje X como una línea de color rojo. Seguidamente se definirá la dirección del eje Y, para ello clic en una arista perpendicular al eje X (**Figura 224.**).

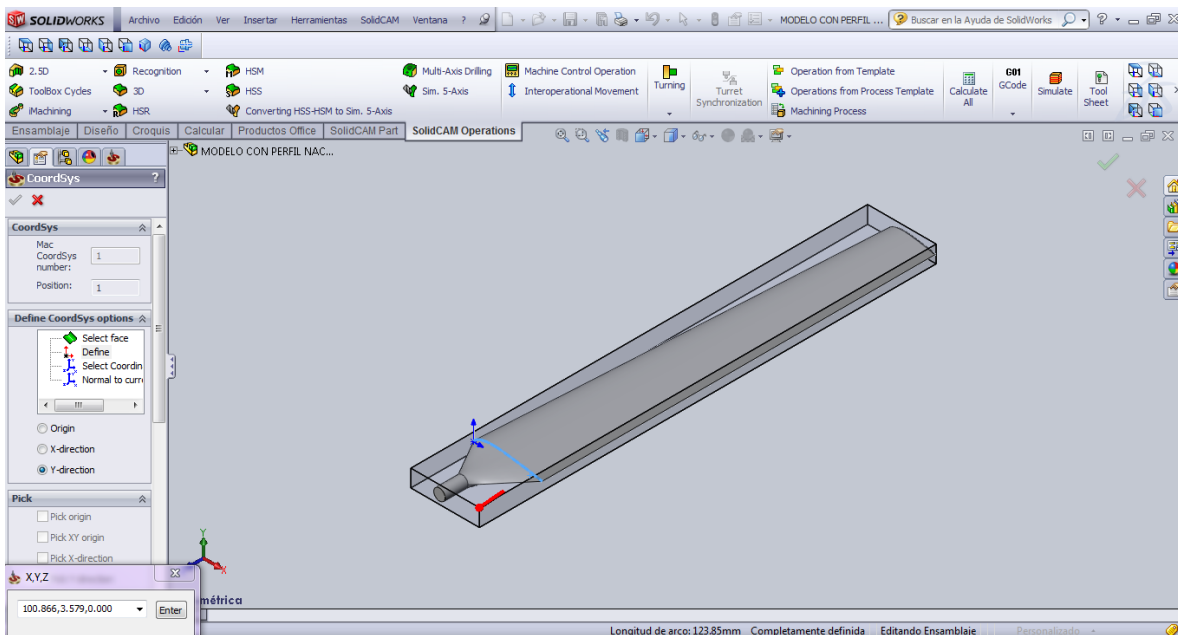


Figura 224. Definir dirección del eje Y.

Al ubicar la dirección del eje Y (línea verde), automáticamente aparecerá el eje Z (línea de color azul), y el sistema de coordenadas quedará definido (**Figura 225.**).

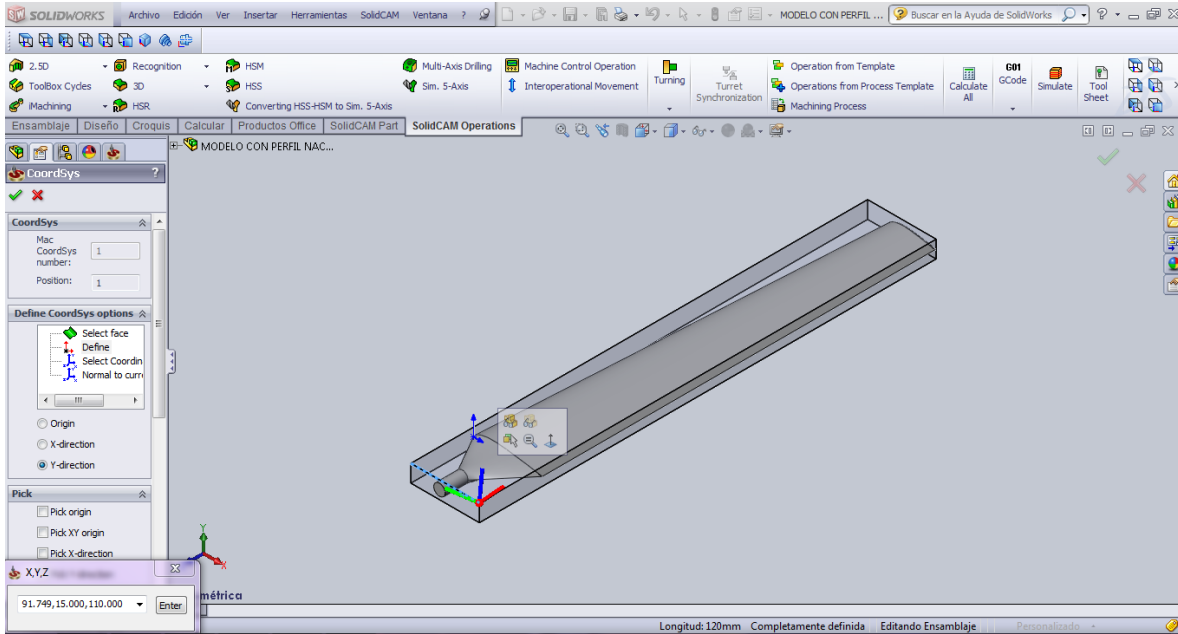


Figura 225. Disposición final del sistema de coordenadas.

Lo siguiente es editar los campos de la ventana de datos del sistema de coordenadas que aparecerá, datos como nivel en el que inicia la herramienta (**tool start level**), nivel superior de la pieza (**part upper level**), nivel inferior de la pieza (**part lower level**), nivel de espacio (**clearance level**), entre otros, si se considera que no se debe realizar ninguna modificación, se hace clic en OK (**Figura 226.**).

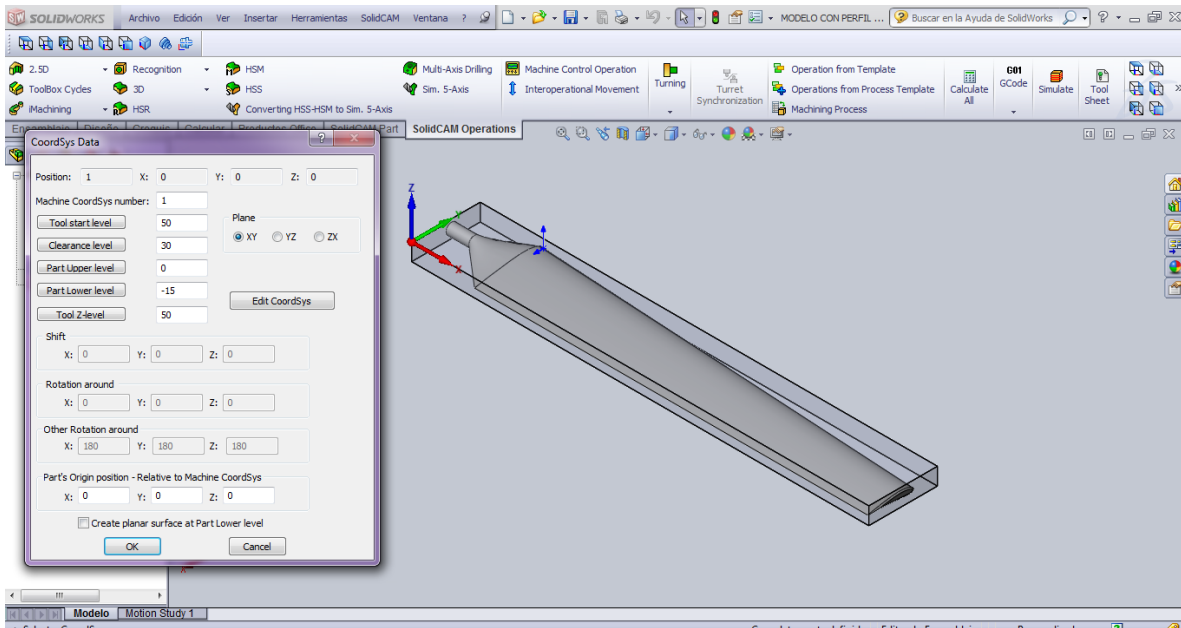


Figura 226. Datos finales del sistema de coordenadas.

Finalmente se hace clic en **Aceptar** para completar la definición del sistema de coordenadas. (**Figura 227.**).

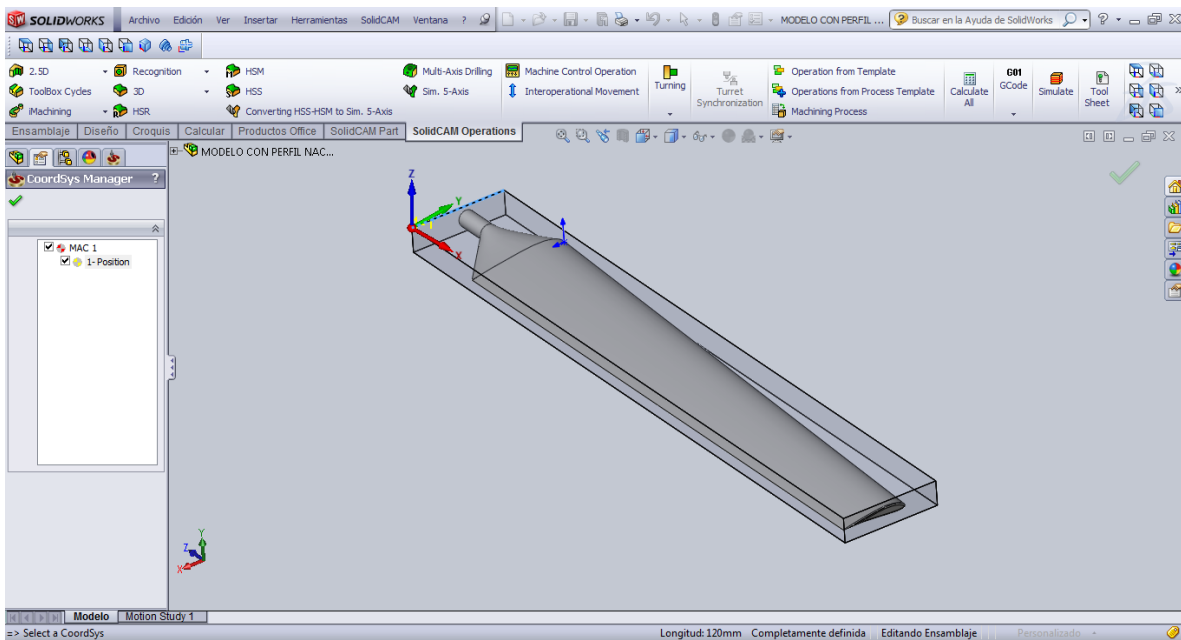


Figura 227. Sistema de coordenadas completamente definido.

Una vez que se tiene definido el sistema de coordenadas, se procede a definir la materia prima (**Stock**) y el modelo a mecanizar (**Target**).

Se hace clic en **Stock and Target model/Stock (Figura 228).**

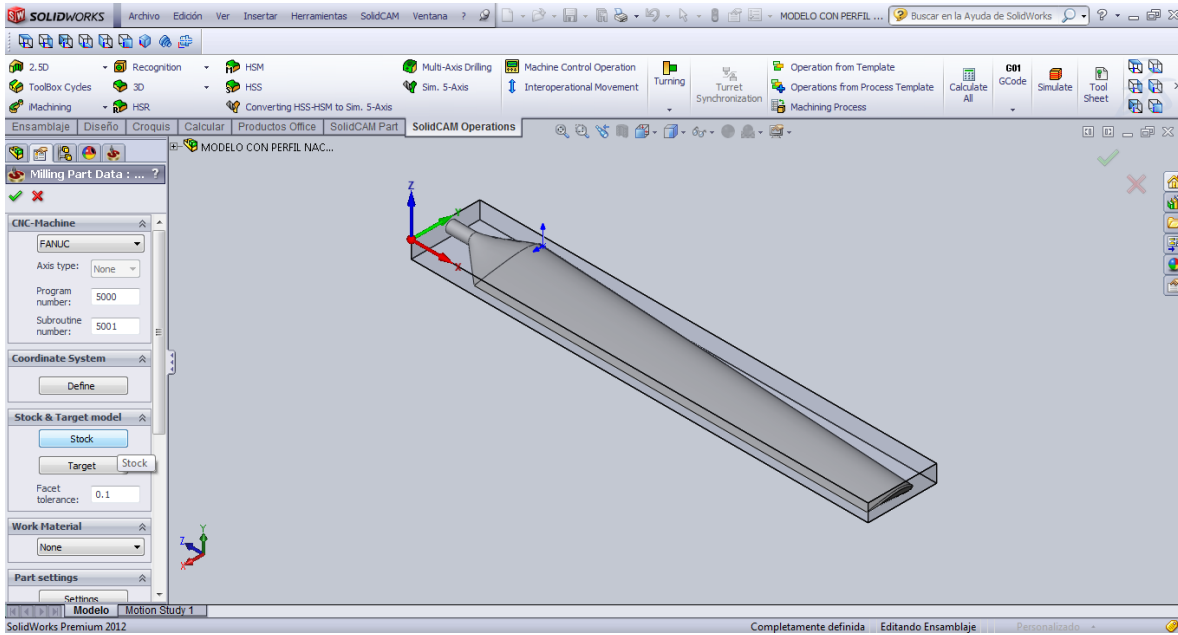


Figura 228. Definiendo la materia prima (Stock).

En la parte izquierda aparecerá la pestaña de **Model**, en la parte de **Type**, por defecto estarán seleccionados los dos sólidos (El de materia prima y el modelo de la pala), así que se hace clic derecho sobre uno de ellos y clic en **Unselect all (Figura 229).**

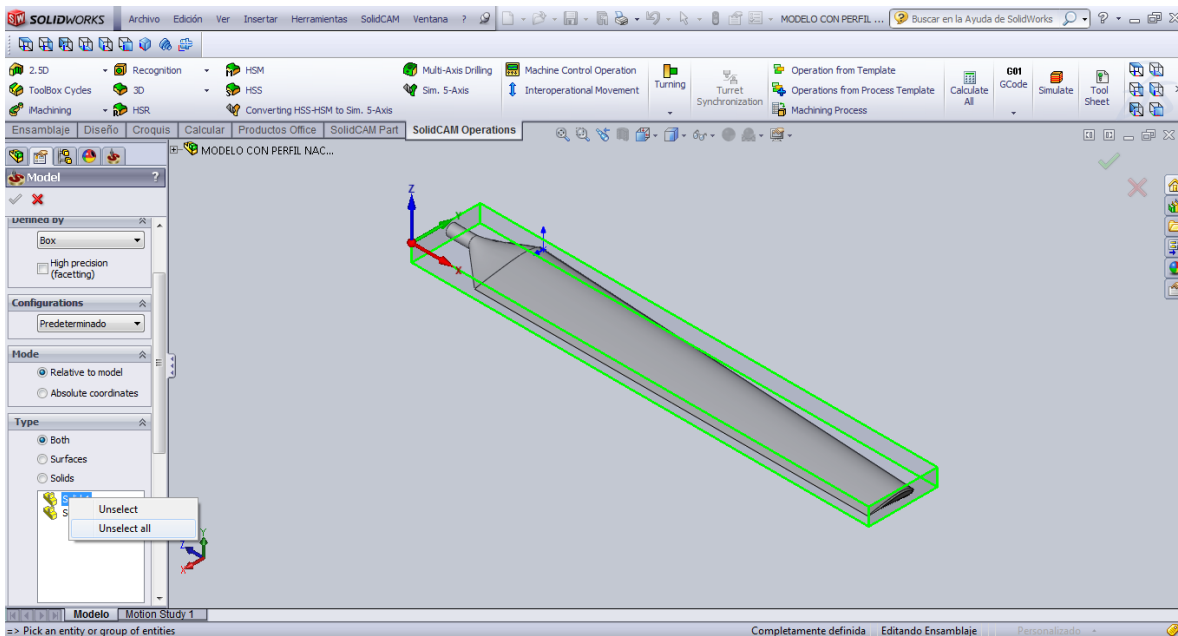


Figura 229. Seleccionando el modelo de materia prima,

Quedara en blanco el espacio de **Type (Figura 230).**

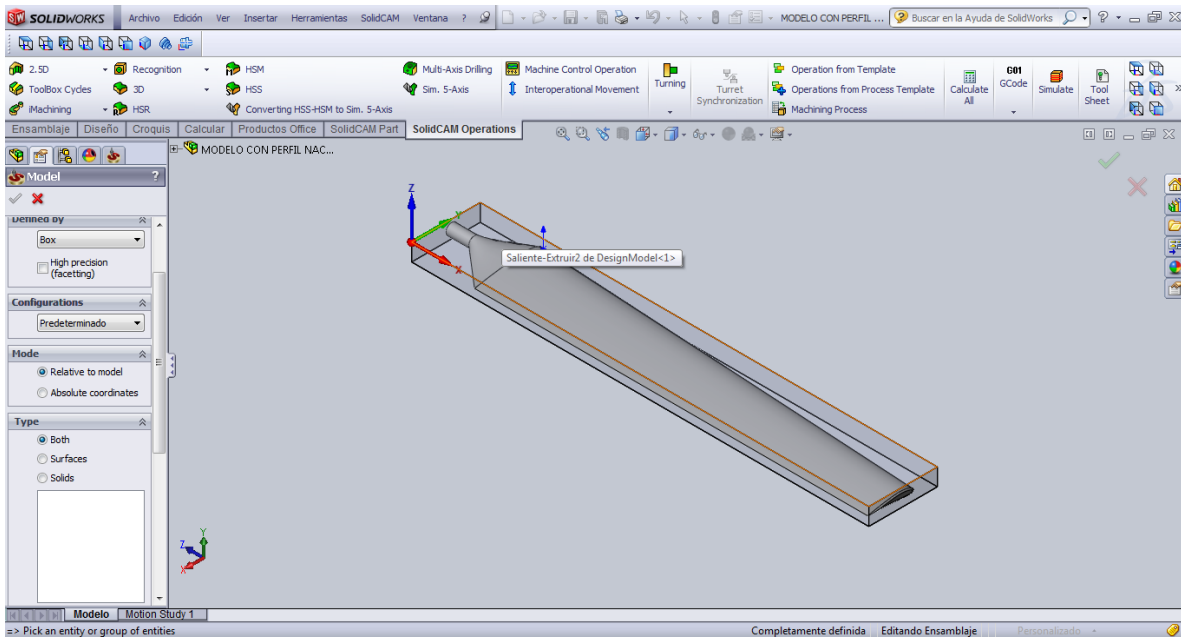


Figura 230. Quitando la selección de ambos sólidos (Modelo de pala y Materia prima).

Luego de esto se selecciona una parte del modelo de materia prima (una arista, una superficie, etc.) (Figura 231.).

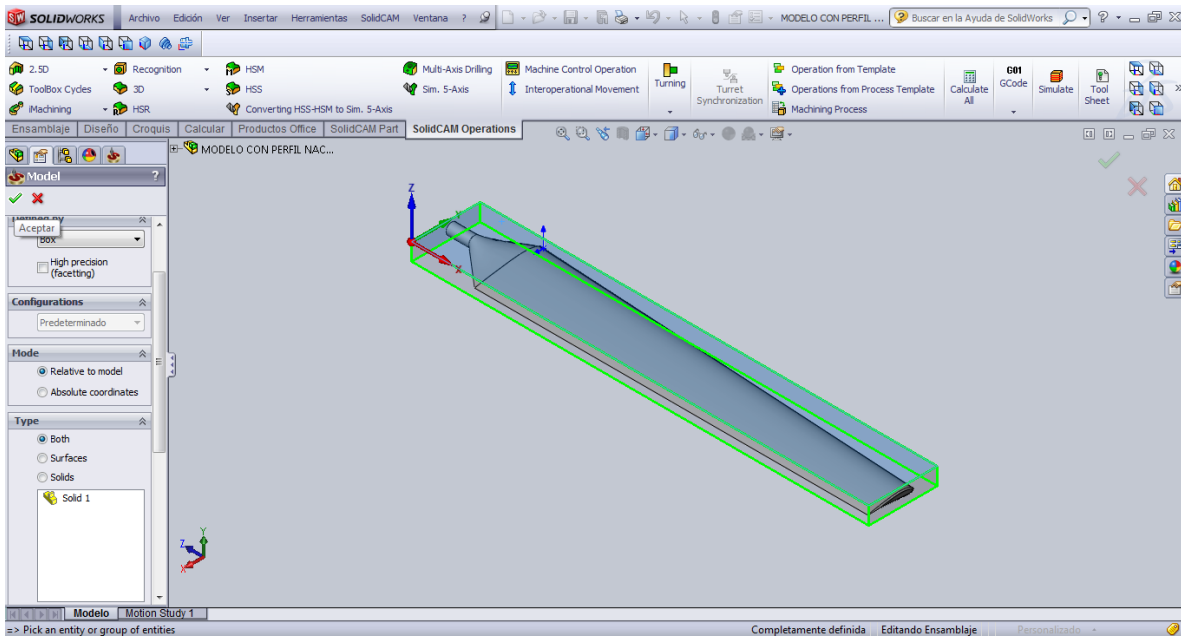


Figura 231. Selección del modelo de materia prima.

Se hace clic en **Aceptar** y **Stock** (materia prima) quedará definido.



Seguidamente se define **Target** (Modelo a mecanizar). Para ello, se hace clic en **Target** en el **PropertyManager** (Figura 232.).

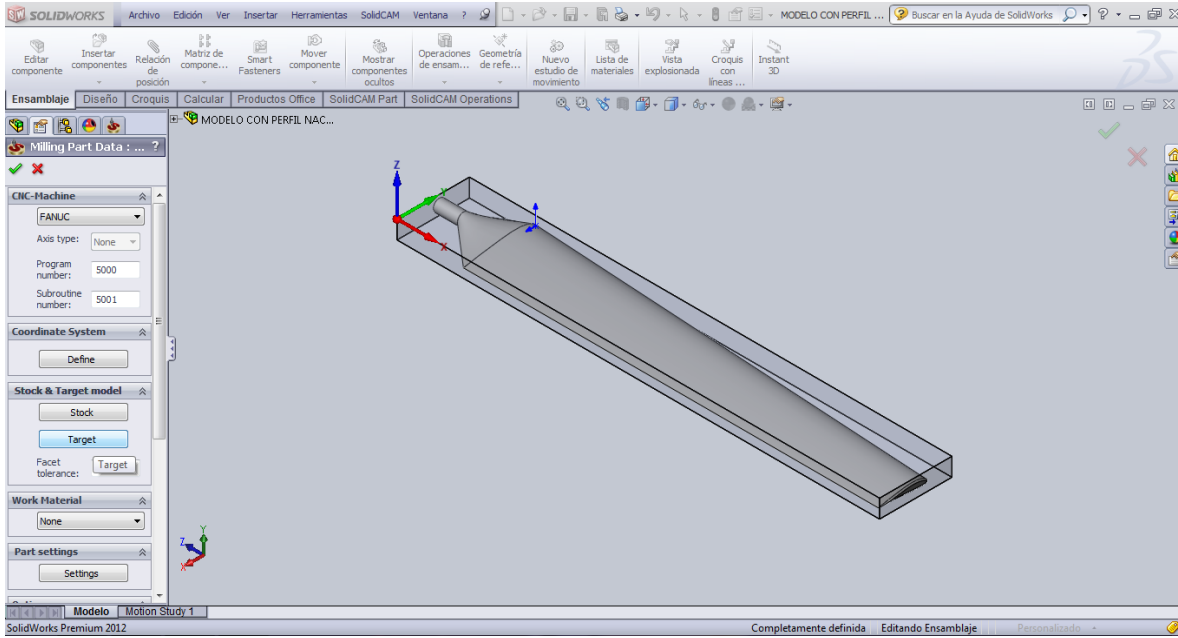


Figura 232. Definir Target (Modelo a mecanizar)

Luego se hace clic en **Define 3D model** (Figura 233.).

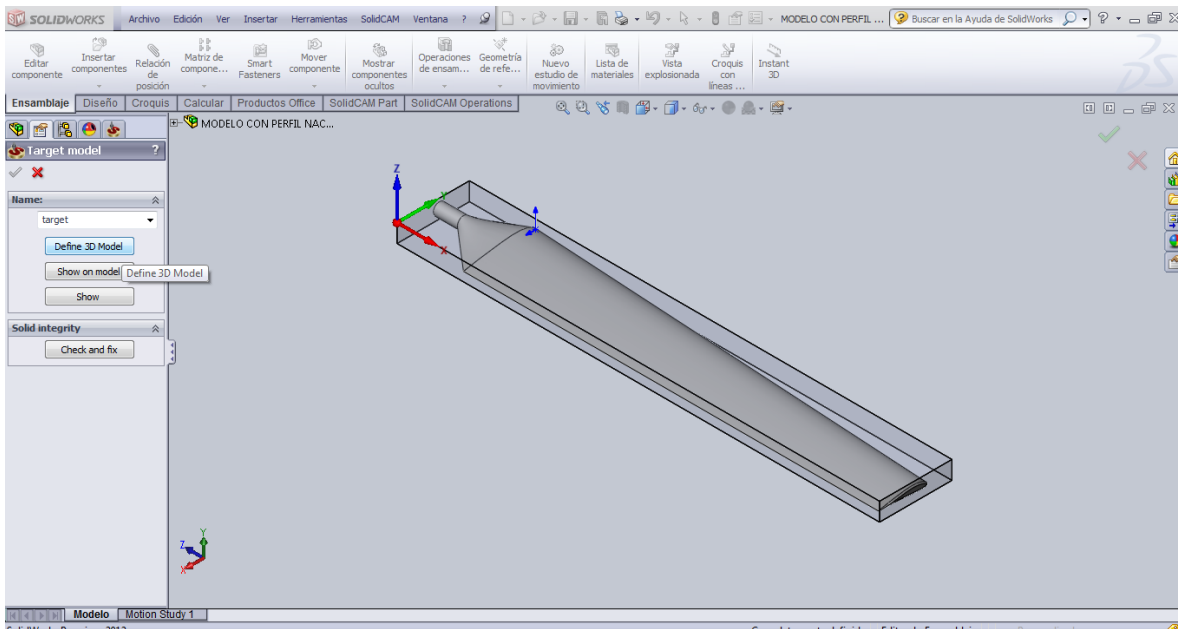


Figura 233. Definir Target.

Aparecerán los dos sólidos seleccionados. Así que se hace clic derecho en cualquiera de los dos y elegir **Unselect all** (Figura 234.).

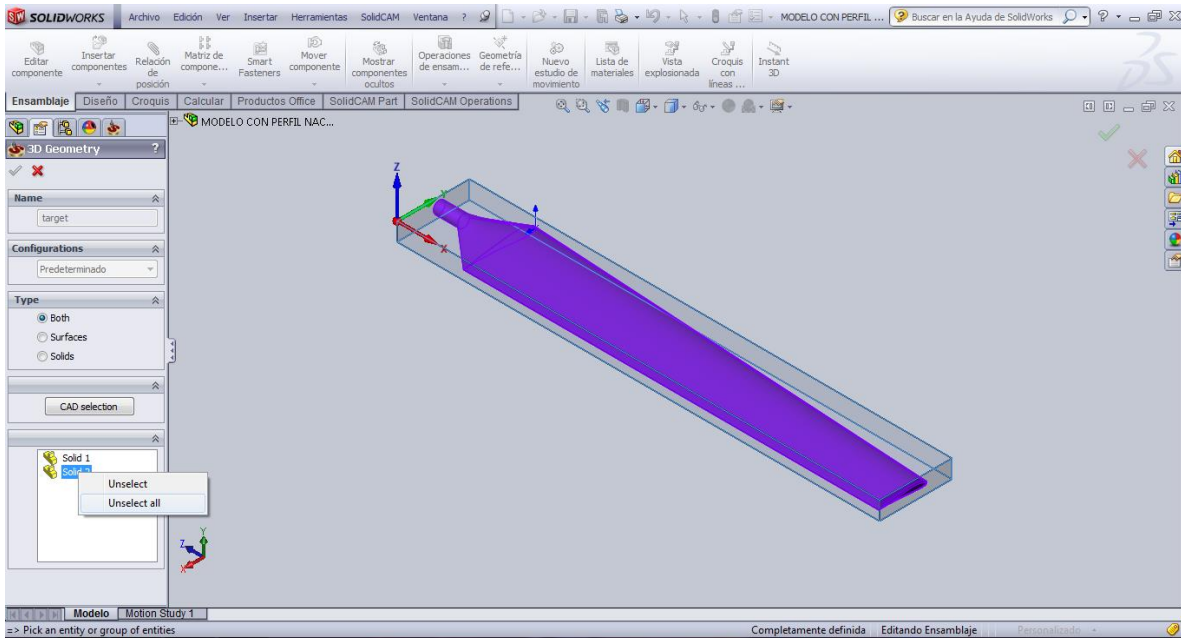


Figura 234. Definir Target.

Luego se hace clic en una parte del modelo (superficie, arista, punto, etc.) (Figura 235.).

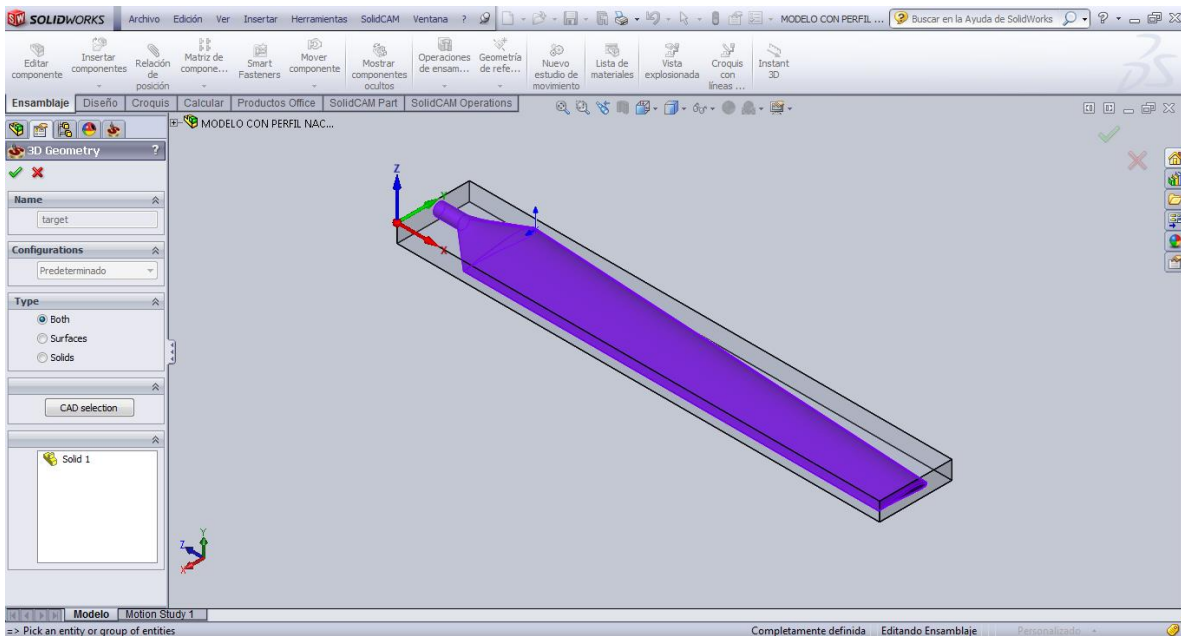


Figura 235. Definir Target.

Se hace clic en aceptar y **Target** quedará definido (Figura 236.).

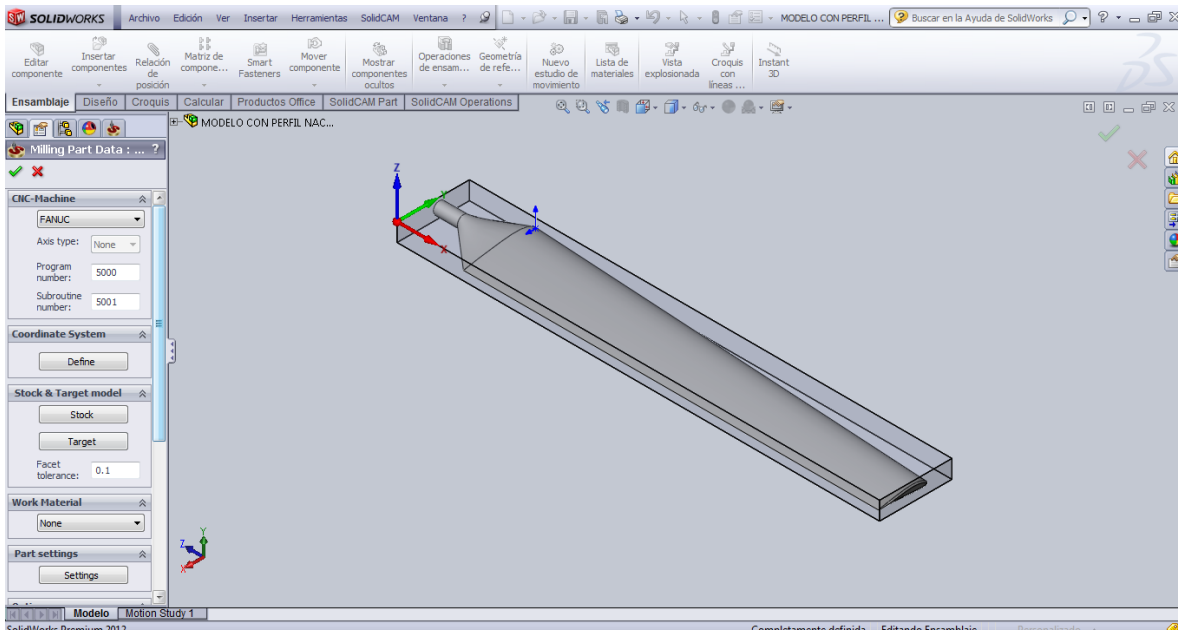


Figura 236. Target definido.

A continuación se hace clic en **Aceptar** y los parámetros de partida quedarán definidos (Figura 237).

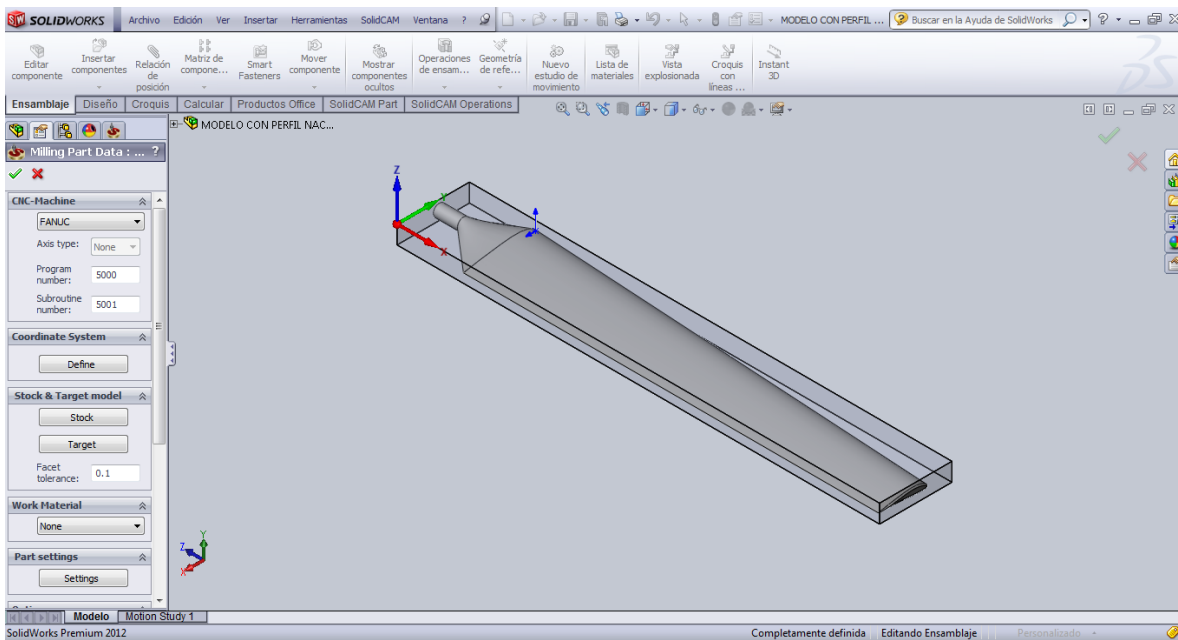


Figura 237. Finalización de la definición de parámetros de partida.

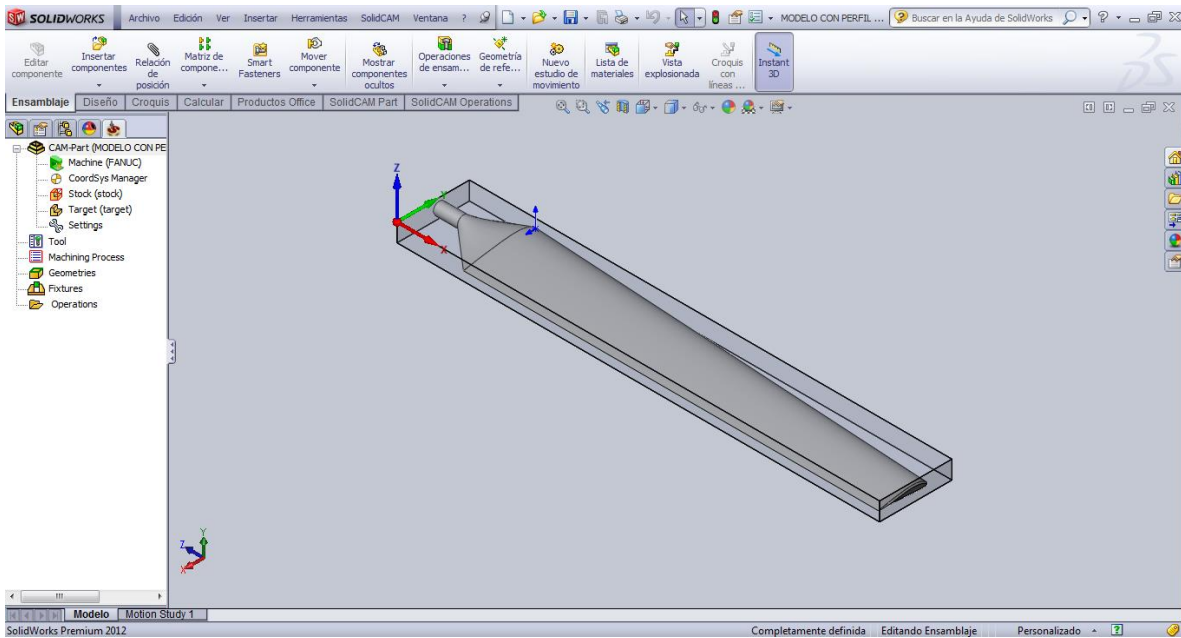


Figura 238. Parámetros de partida definidos.

3. El siguiente paso es definir las operaciones de mecanizado para la parte superior.

3.1.La primera operación que se aplicó, es la de desbaste (**3D Milling**), para ello se ubica en la pestaña de **SolidCAM Operations** (Figura 239.).

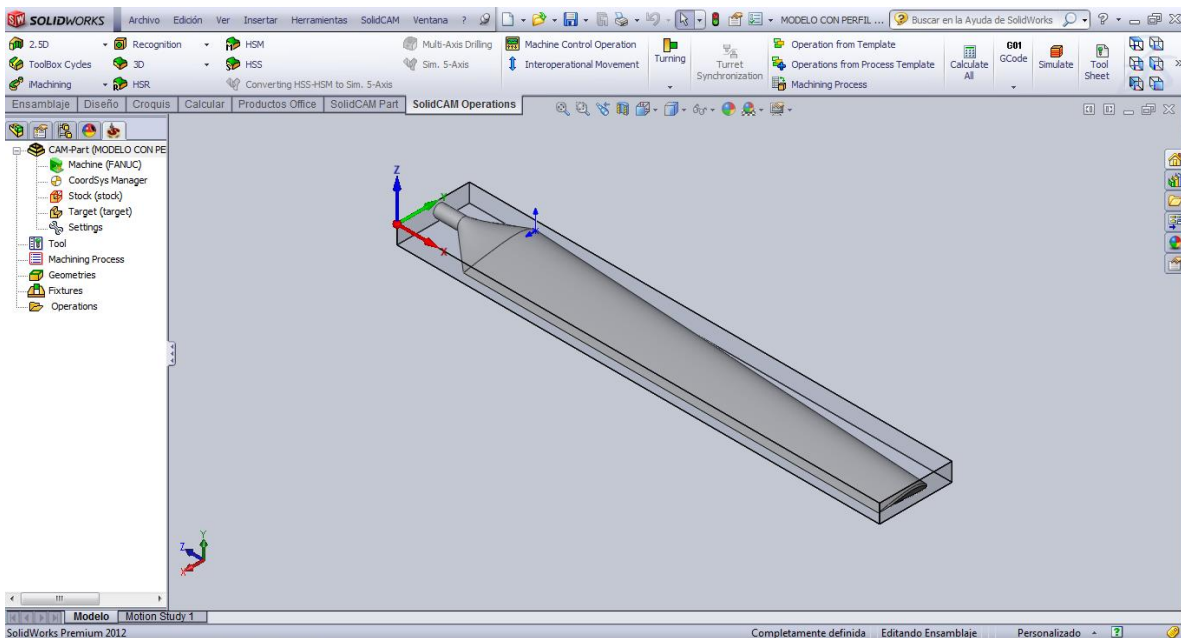


Figura 239. Definir Operaciones de Mecanizado.

Después se hace clic en **3D/3D Milling** (Figura 240.).

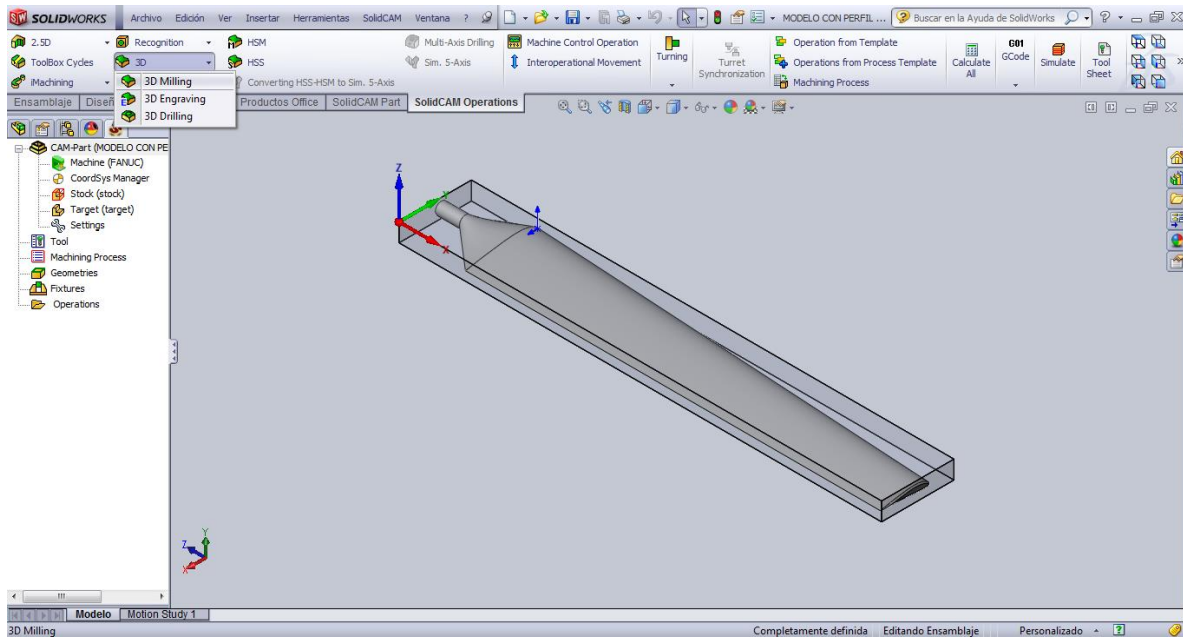


Figura 240. Definir operación de desbaste (3D Milling).

Aparecerá la ventana de la operación **3D Milling**, en ella se selecciona la parte de **Geometry** (Geometria) (**Figura 241**).

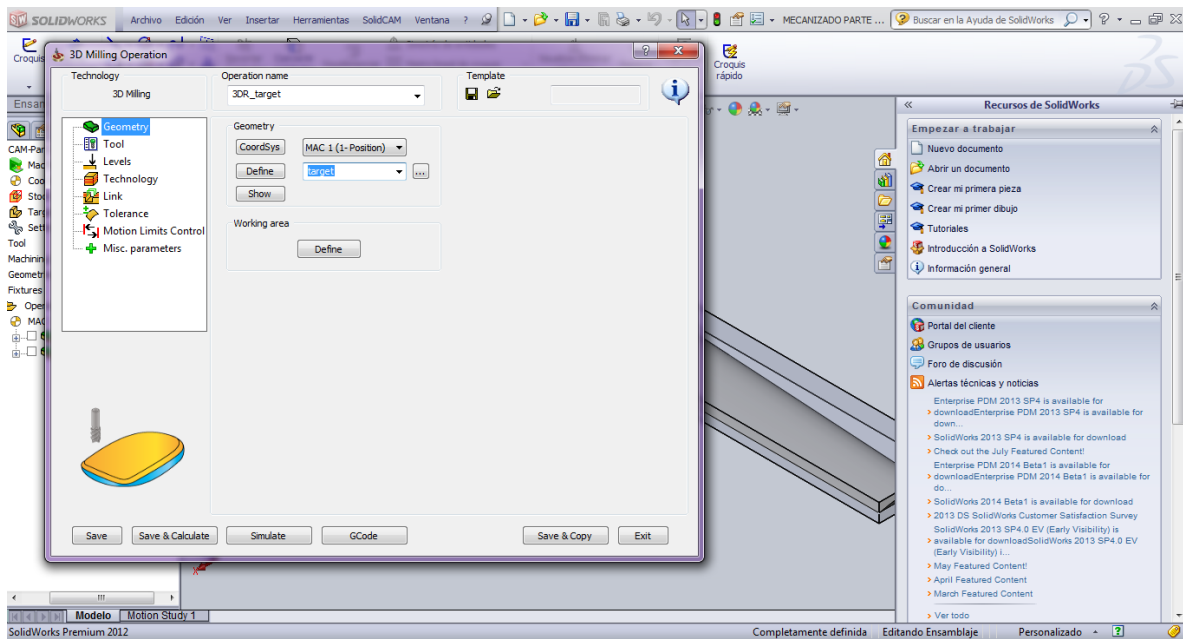


Figura 241. Modificar Geometry

Luego se hace clic en **Define** (Definir), debajo del título de **Working Area** (Área de trabajo) (**Figura 242**).

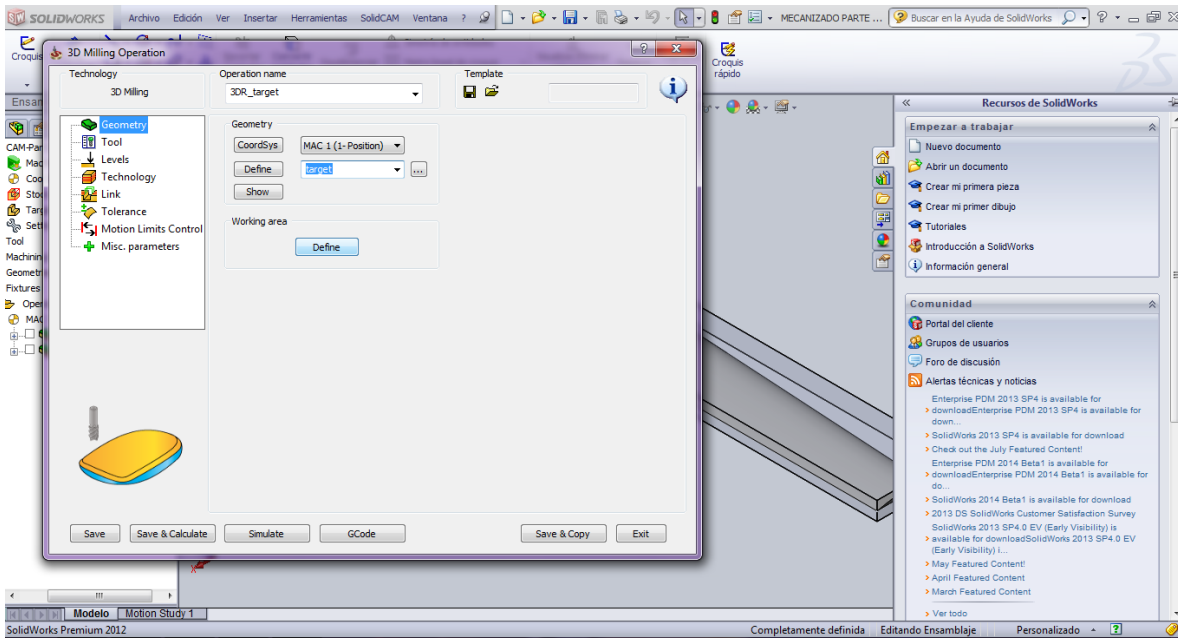


Figura 242. Definir Working Area

Aparecerá una ventana en la cual se hace clic al lado de **Working Area** en la parte superior (Figura 243.).

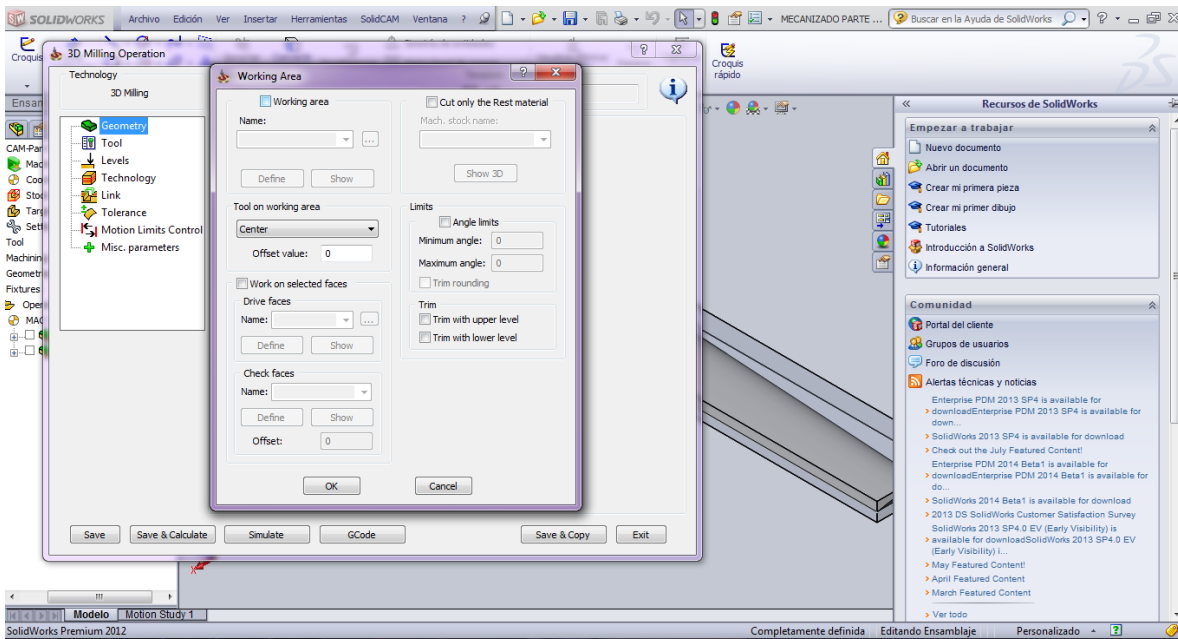


Figura 243. Definir Working Area

Aparecerá un visto al lado del título **Working Area**, lo siguiente es hacer clic en **Define** (Figura 244.).



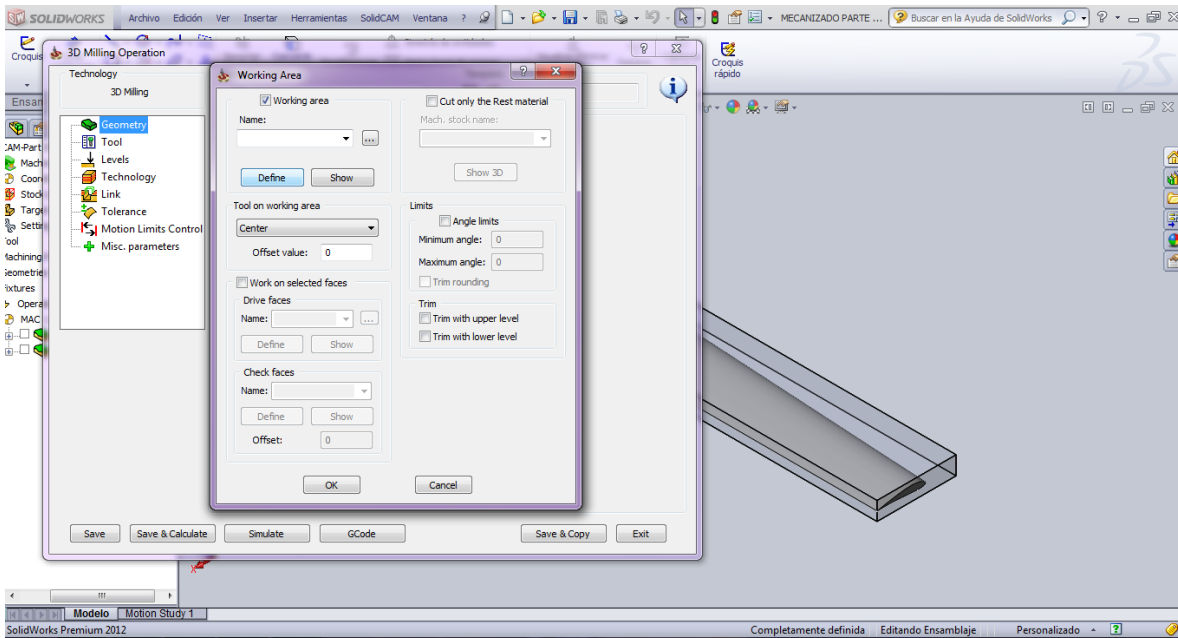


Figura 244. Definir Working Area

En la parte de **Chain** (Cadena), se selecciona la opción **point to point** (punto a punto) (Figura 245).

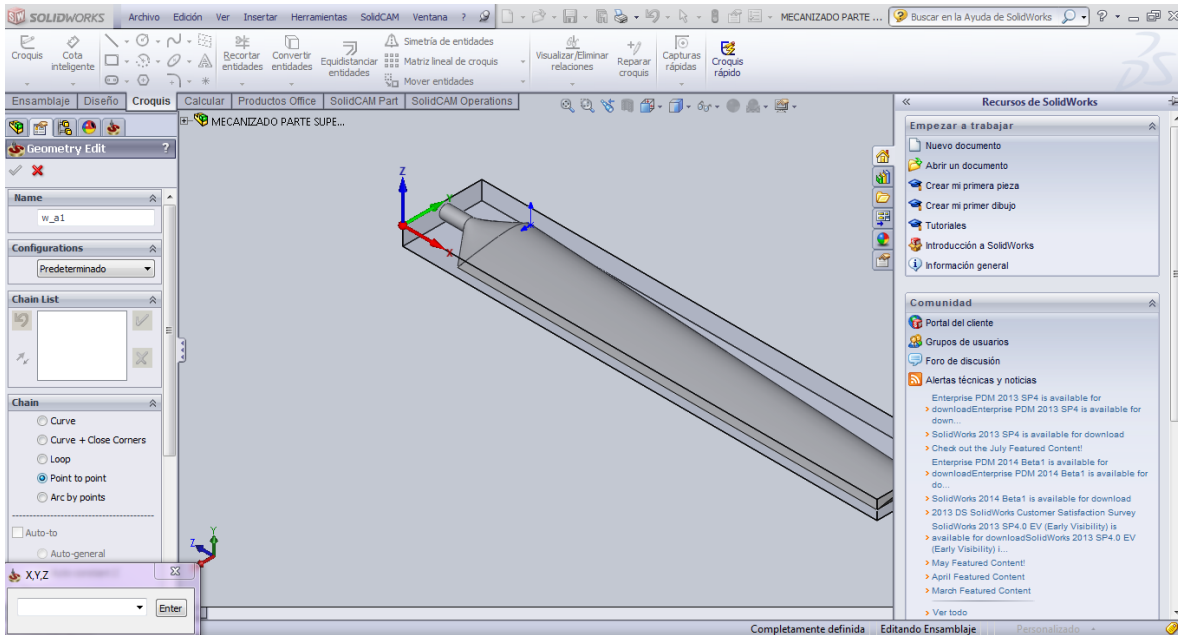


Figura 245. Definir Working Area

Luego se podrán seleccionar los puntos de la superficie que comprenderá el área de trabajo, en este caso la superficie superior de la materia prima. Se selecciona como primer punto, el

punto de origen del sistema de coordenadas, se podrá observar en la ventana ubicada en la parte inferior izquierda las coordenadas de dicho punto, en este caso **(0, 0, 0)** (**Figura 246.**).

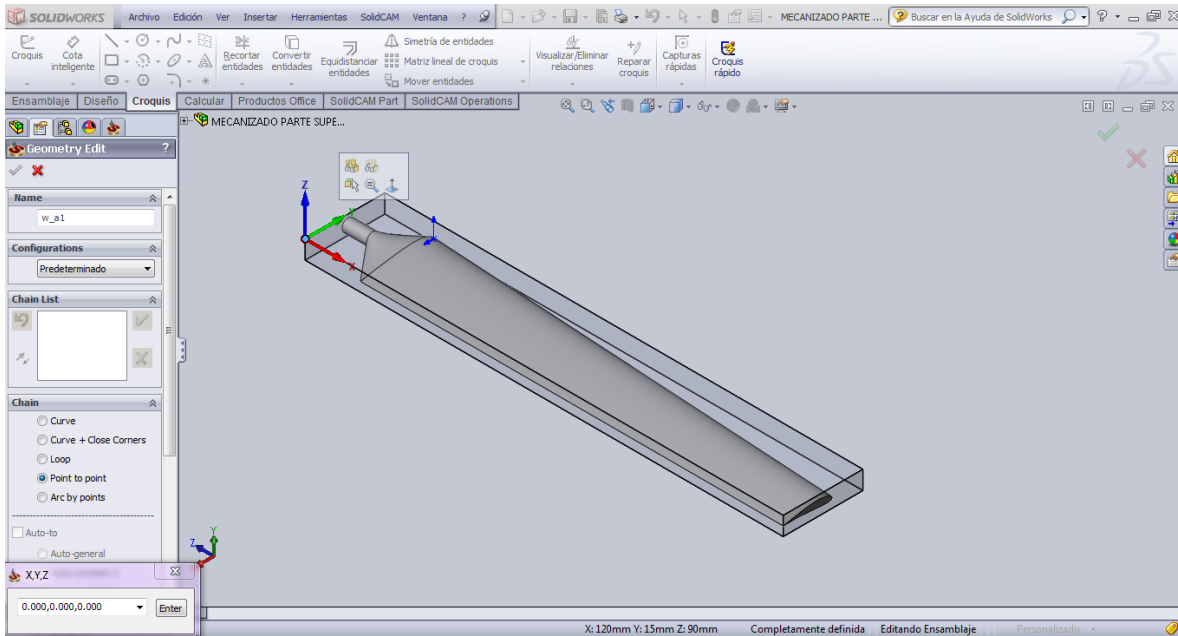


Figura 246. Definir puntos de Working Area

Se selecciona el segundo punto (**Figura 247.**).

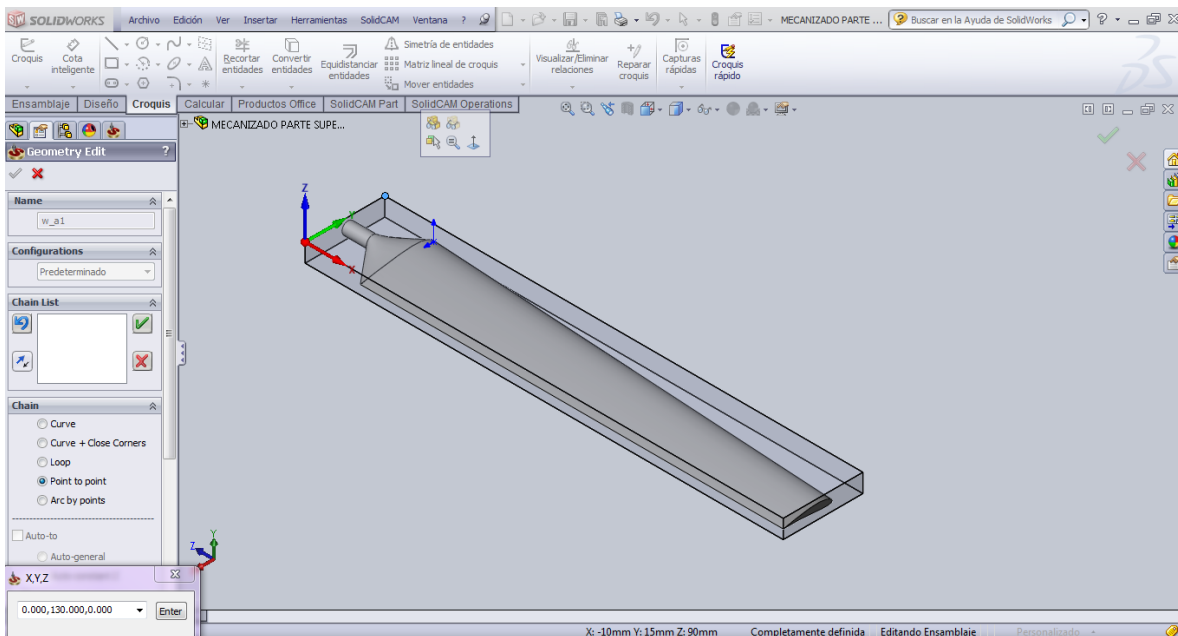


Figura 247. Definir puntos de Working Area.

Se selecciona el tercer punto (**Figura 248.**).



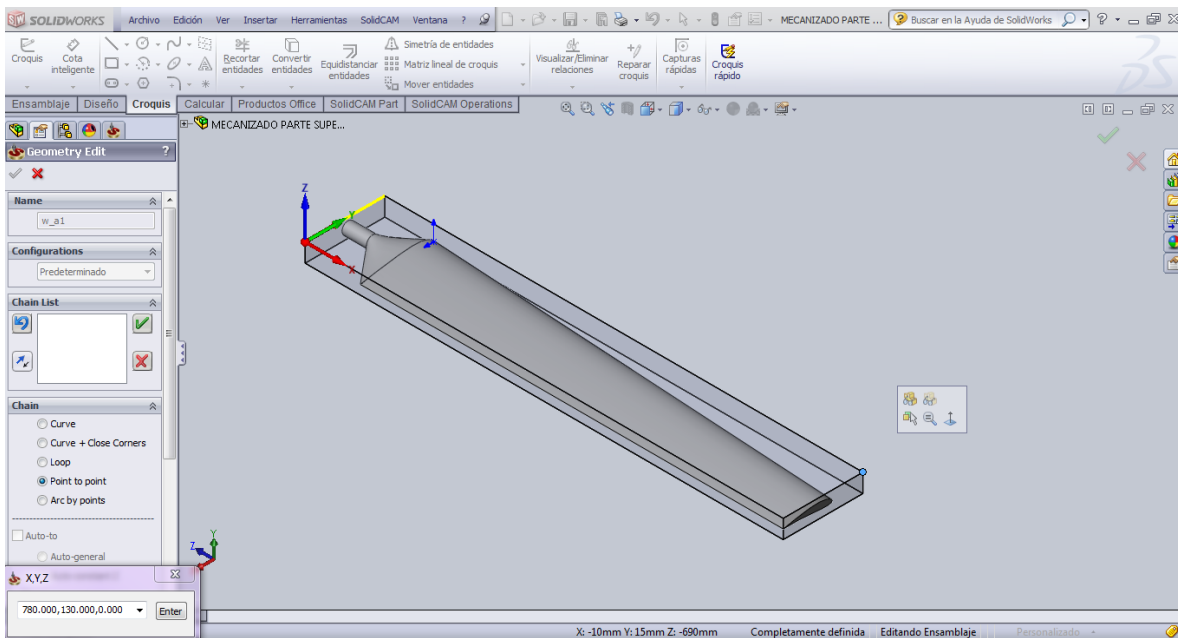


Figura 248. Definir puntos de Working Area.

Se selecciona el cuarto punto (Figura 249).

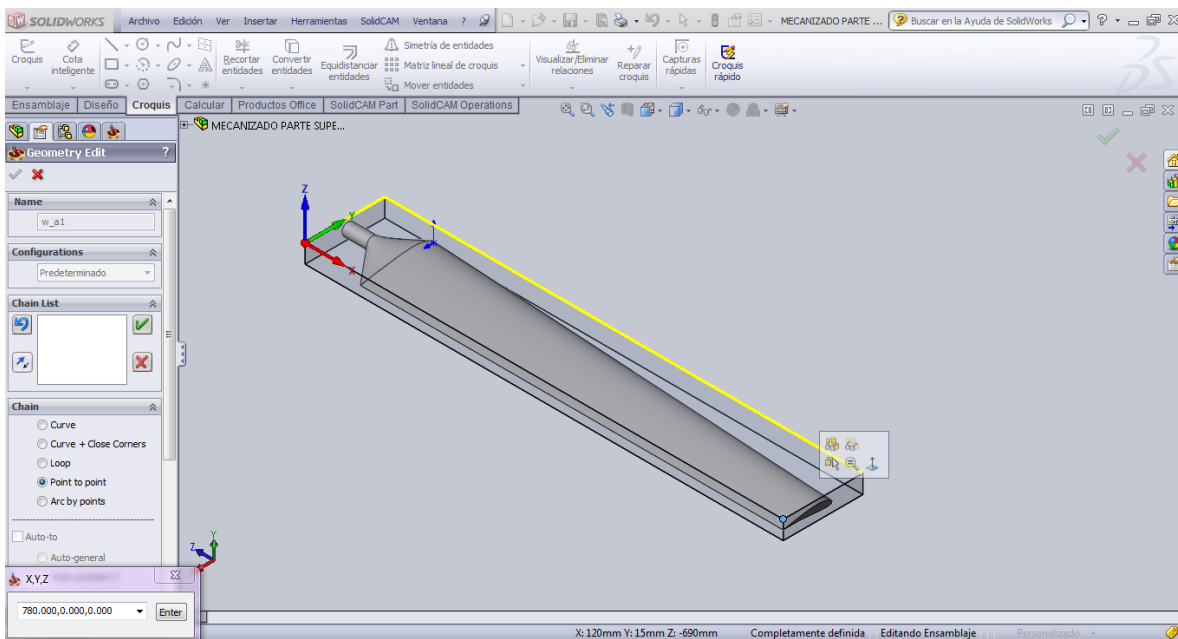


Figura 249. Definir puntos de Working Area

Por último se selecciona el primer punto para cerrar el área de trabajo, aparecerá una ventana de confirmación, se hace clic en OK (Figura 250).

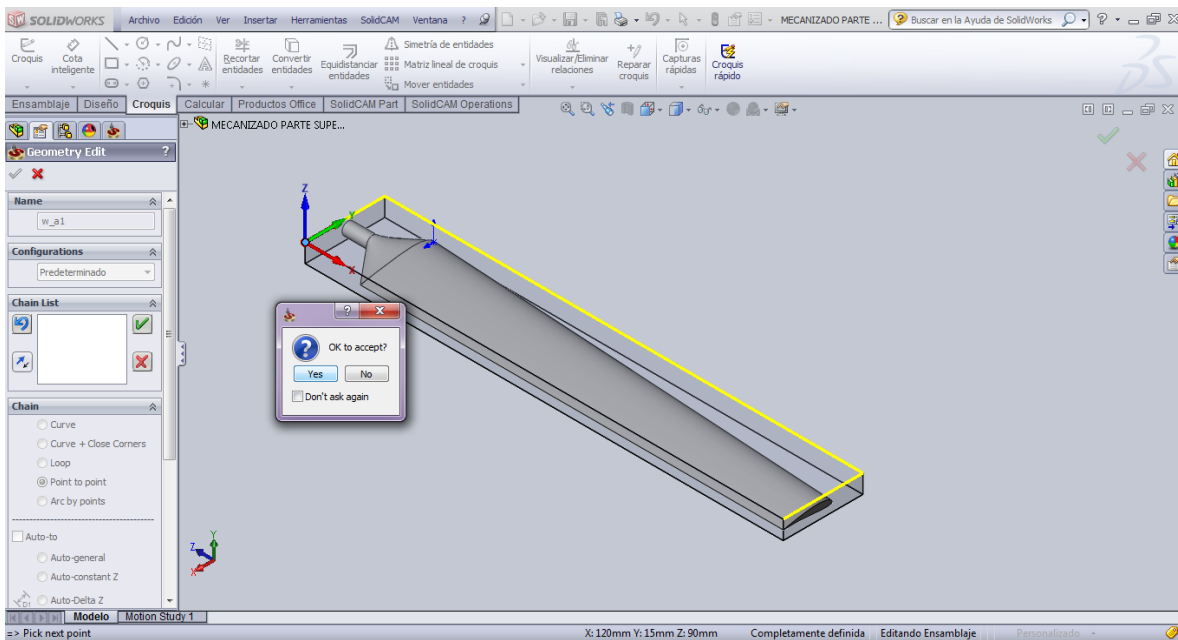


Figura 250. Confirmar Working Area

El área de trabajo quedará delimitada por un perímetro de color naranja, luego de esto se hace clic en **Aceptar**(Figura 251).

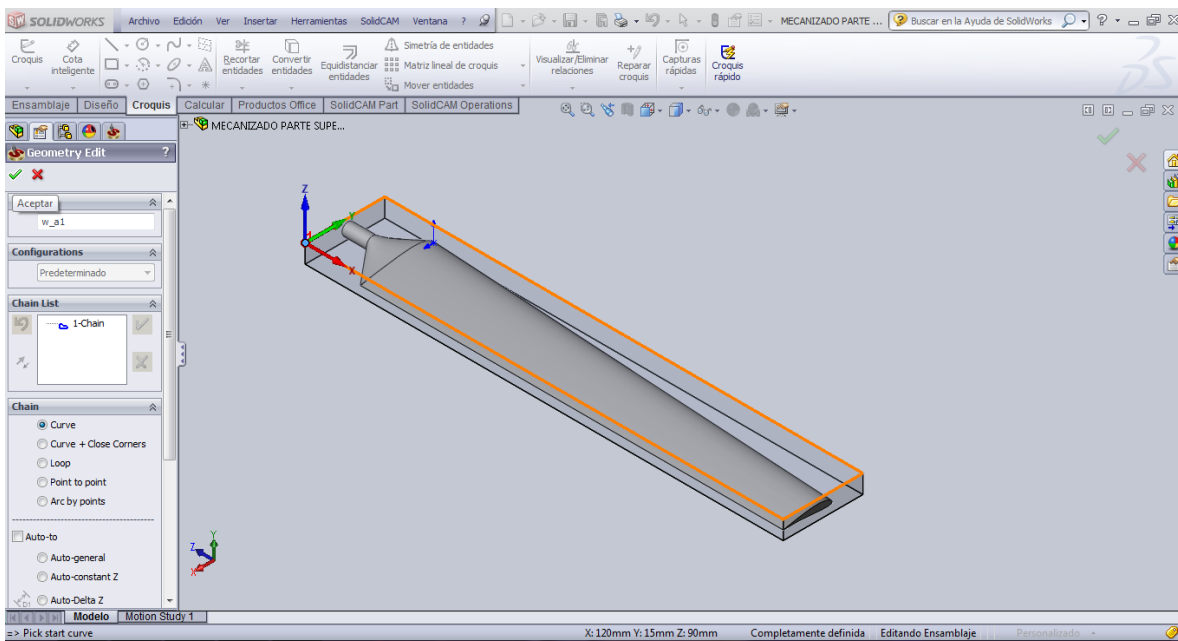


Figura 251. Working Area definida

Aparecerá la ventana inicial, se hace clic en **OK** (Figura 252).

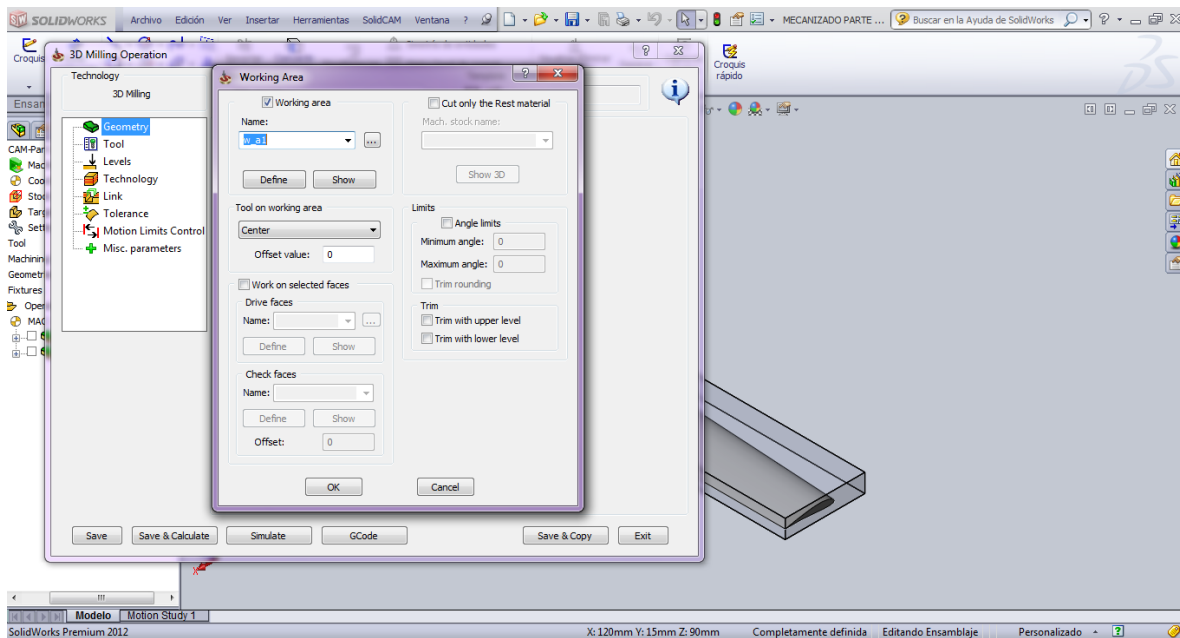


Figura 252. Confirmar Working Area

Lo siguiente es seleccionar la parte correspondiente a **Tool** (Herramienta-Fresa) (**Figura 253.**).

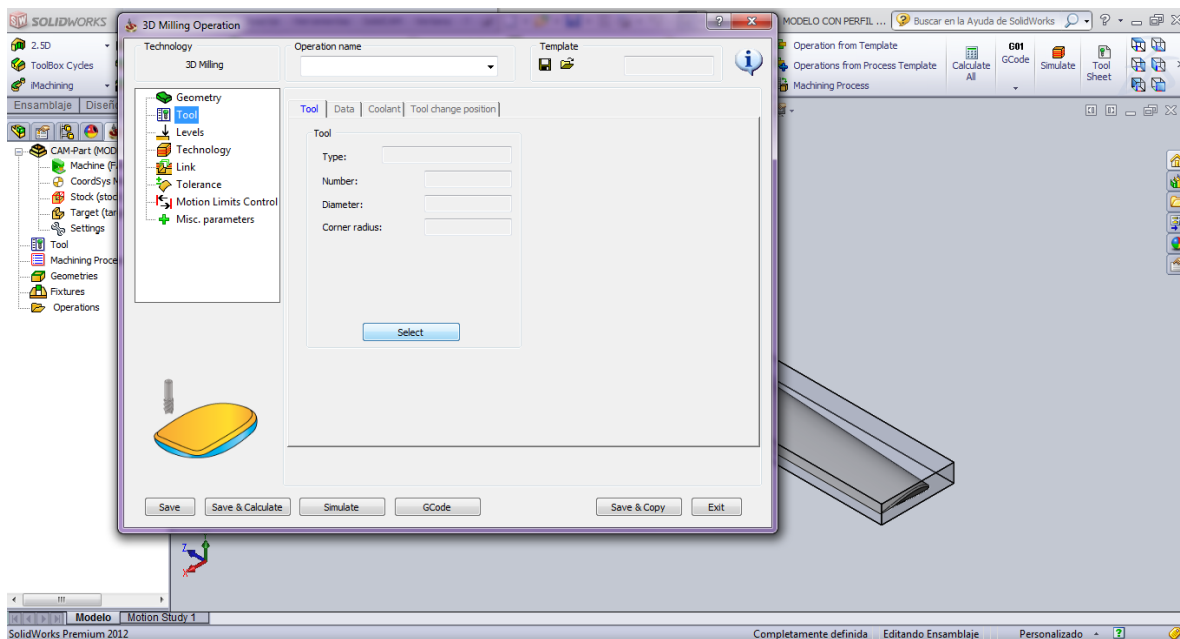


Figura 253. Definir Tool.

Luego de hacer clic en **Select**, aparecerá una ventana para escoger la herramienta, por defecto estará vacía, así que se hace clic en **Add Milling Tool** (**Figura 254.**).

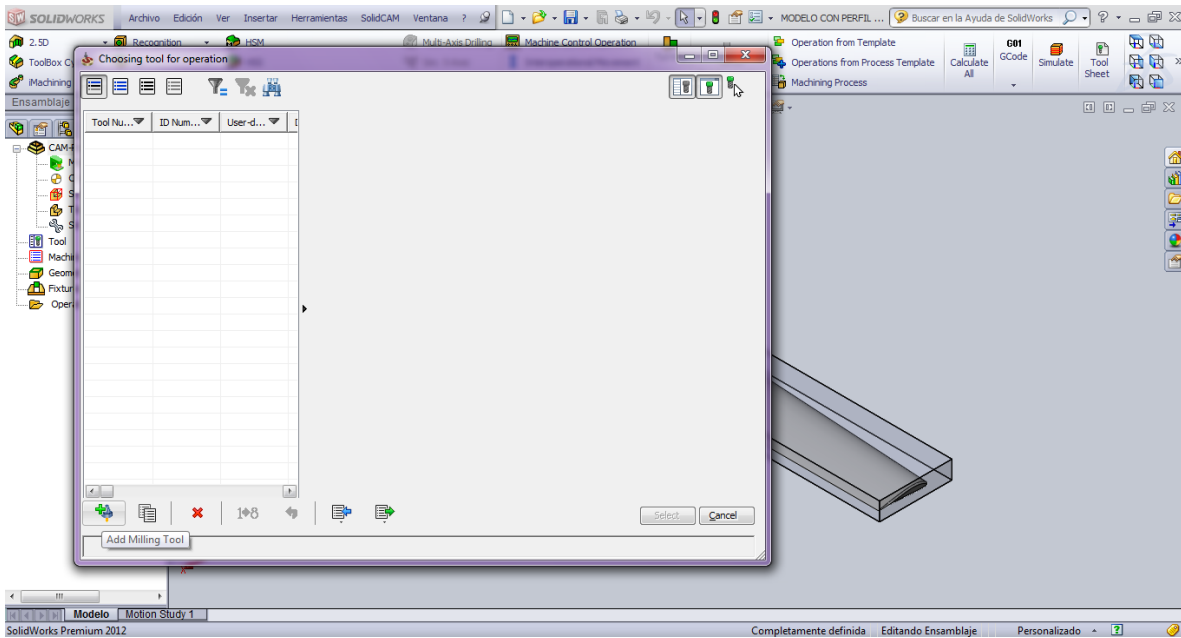


Figura 254. Añadir Tool.

Aparecerán diferentes tipos de fresas, en este caso se trabajará con **END MILL** (Figura 255.).

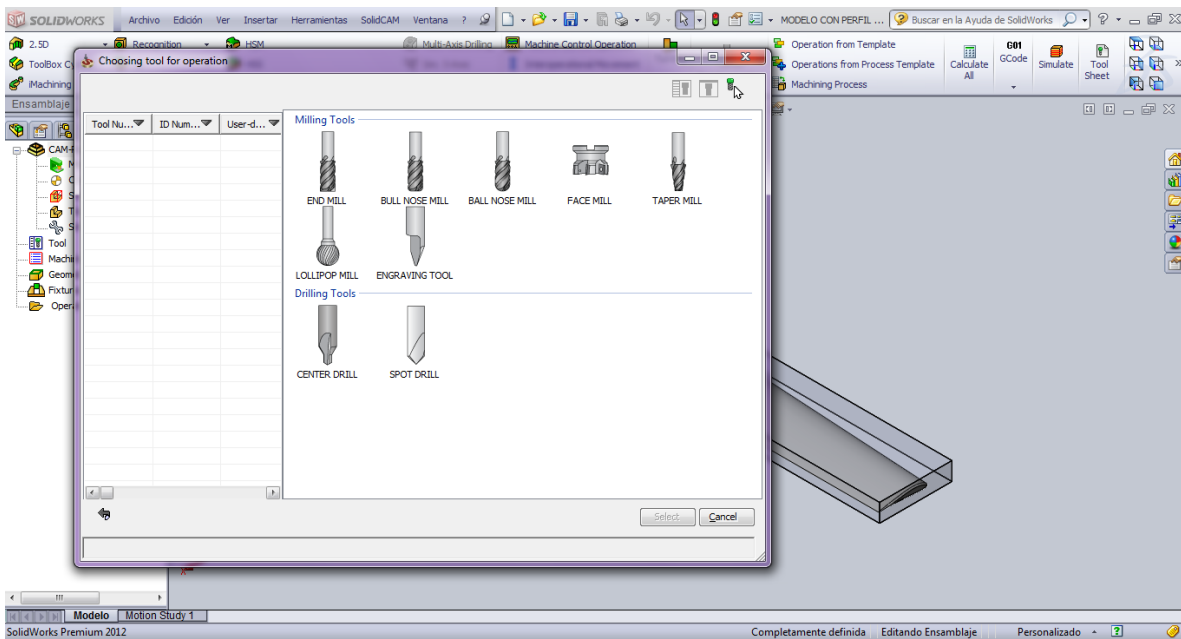


Figura 255. Definir tipo de fresa.

Luego de seleccionar el tipo de fresa, se debe modificar las características de la misma, en este caso modificará los valores de **Diameter** (Diámetro de fresa), **Arbor Diameter** (diámetro de árbol de fresa) y **Number of Flutes** (Número de labios) (Figura 256.).

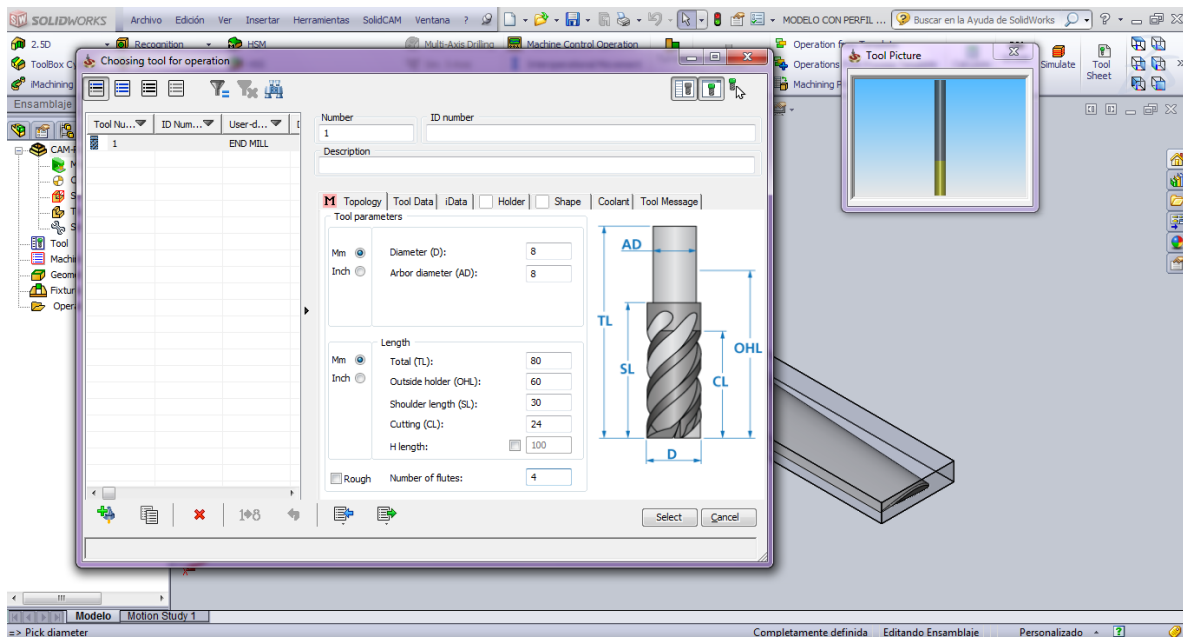


Figura 256. Modificación de características de fresa.

La herramienta quedará definida (**Figura 257.**).

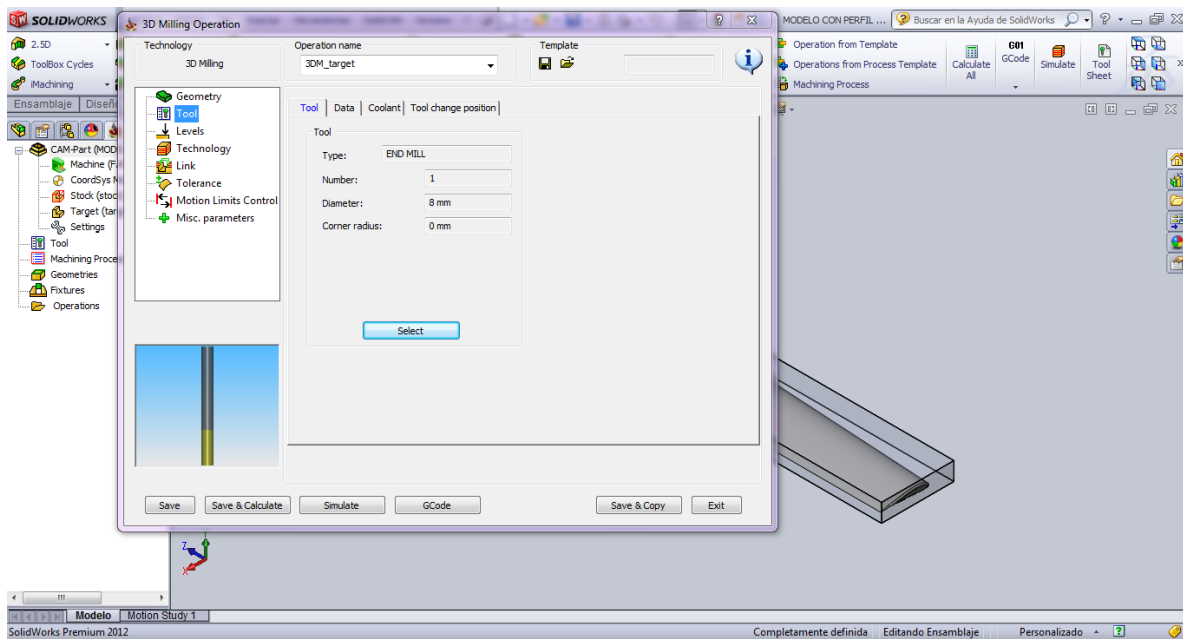


Figura 257. Herramienta definida.

A continuación, se define **Technology** (Tecnología), se hace clic en **Rough**, se tiene tres opciones para el desbaste, las que más se adaptan a los requerimientos para el mecanizado del modelo son **Hatch** y **Contour**, se elige **Contour** (**Figura 258.**).

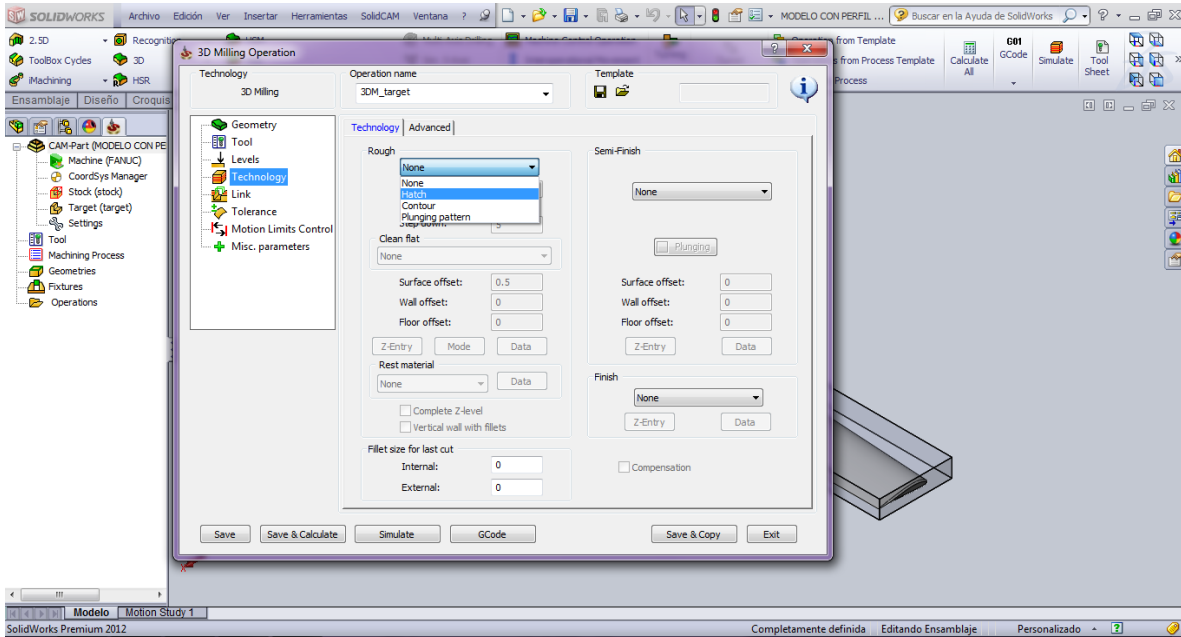


Figura 258. Definir tipo de desbaste.

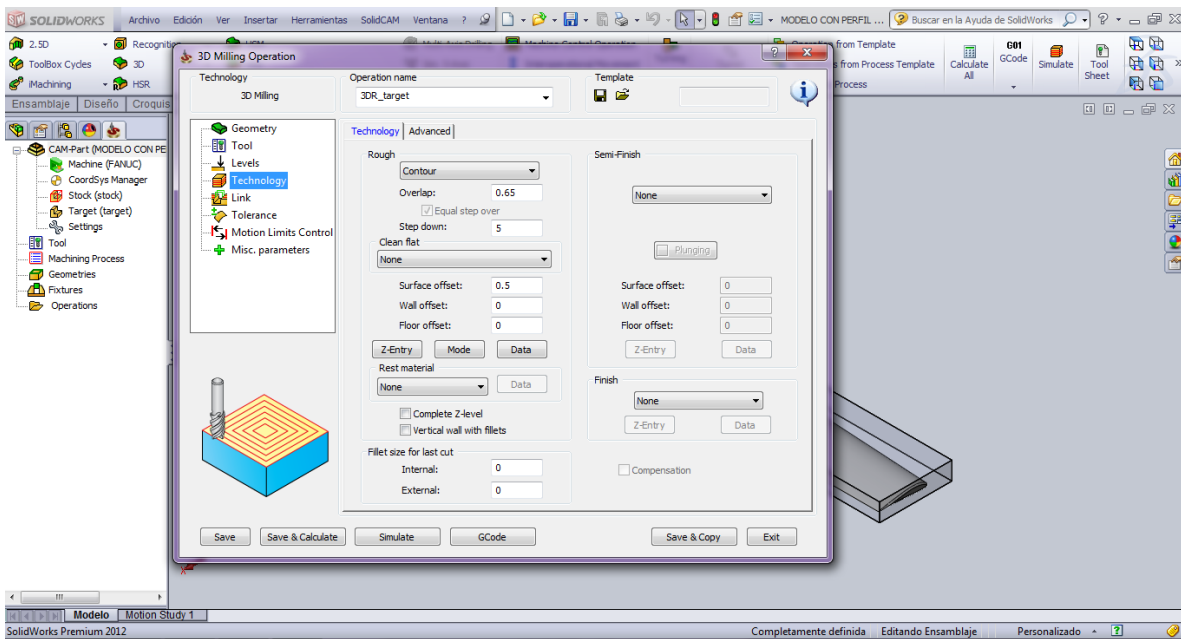


Figura 259. Contour definido.

Posteriormente se modifica el valor de **Overlap** (Traslapo o la distancia que la herramienta regresará por el recorrido anterior, en porcentaje del diámetro de la fresa) (**Figura 260**).

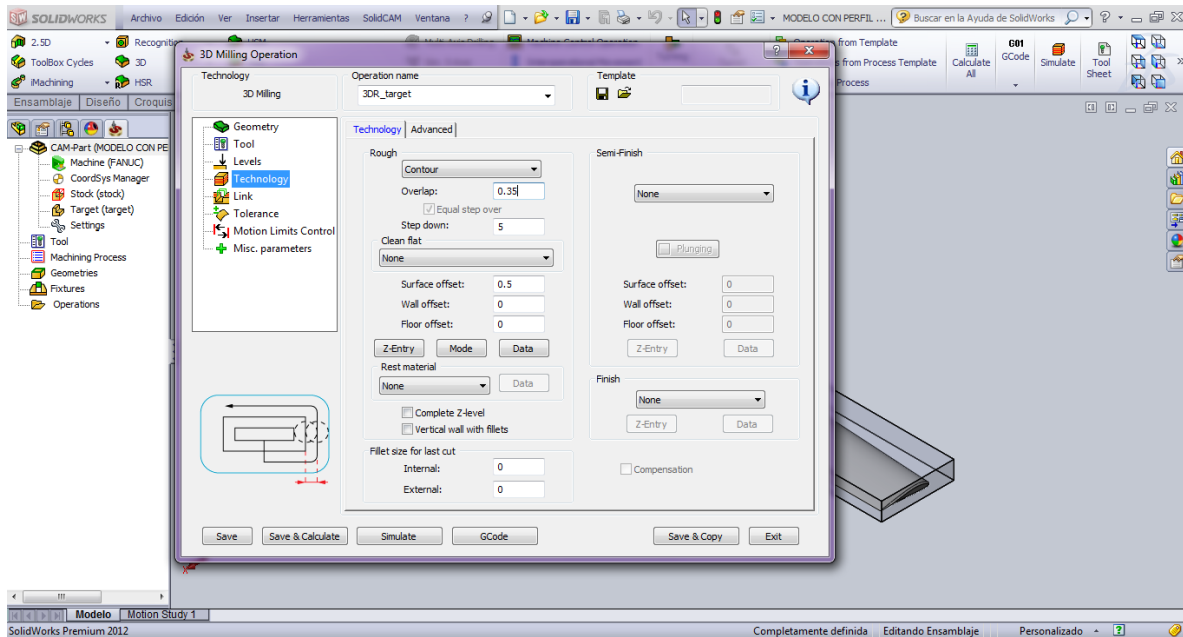


Figura 260. Modificar valor Overlap.

El siguiente parámetro que se modifica es **Step down** (milímetros de material que la herramienta arrancará por cada pasada) (Figura 261.).

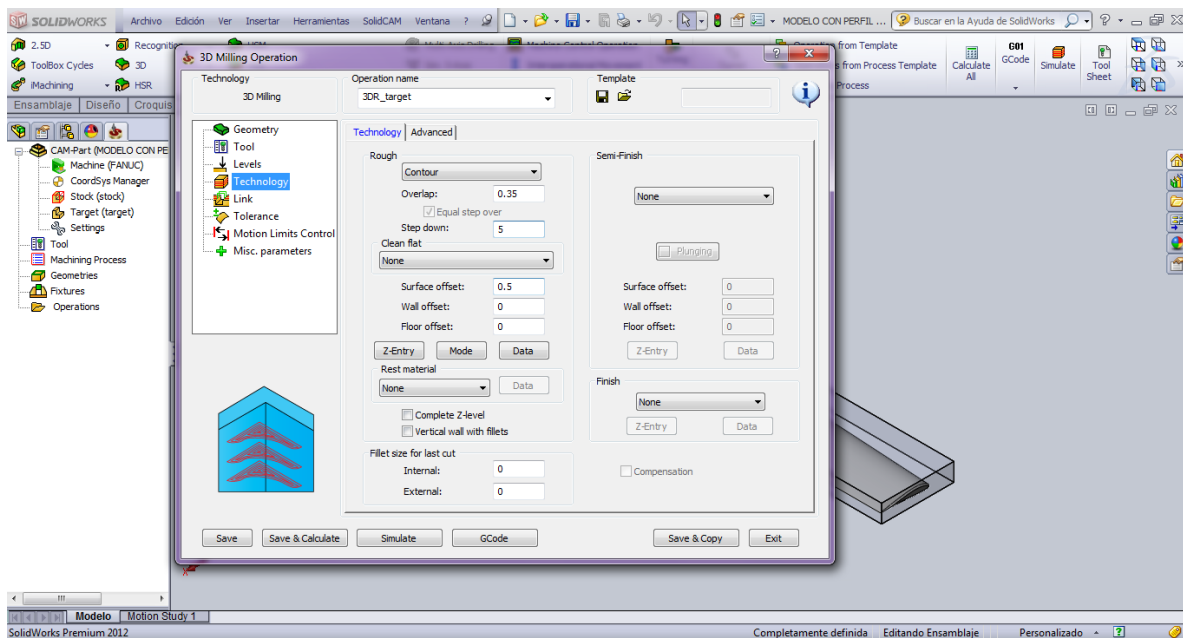


Figura 261. Modificar valor de step down.

Otro valor que se modifica es el de **Surface offset** (es una tolerancia de mecanizado, significa que del valor de la medida de material arrancado, el valor de Surface offset es el material que no se arrancará) (**Figura 262.**).

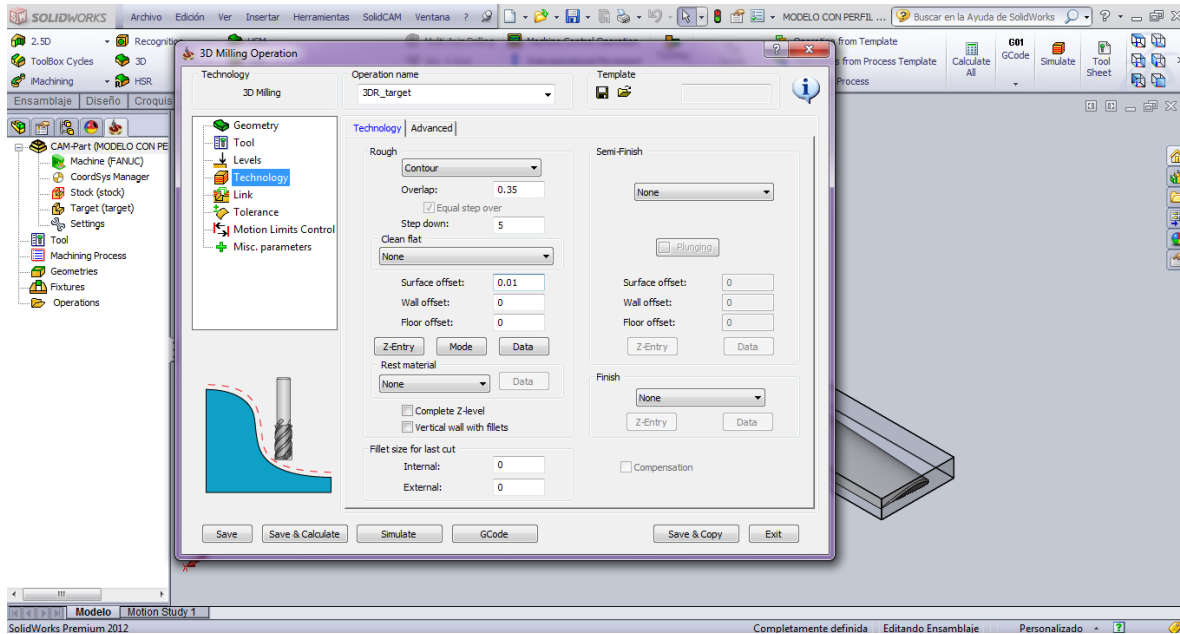


Figura 262. Modificar valor de Surface offset.

Una vez definidos estos valores, se hace clic en **Save & Calculate**, y luego en **Simulate** (**Figura 263.**).

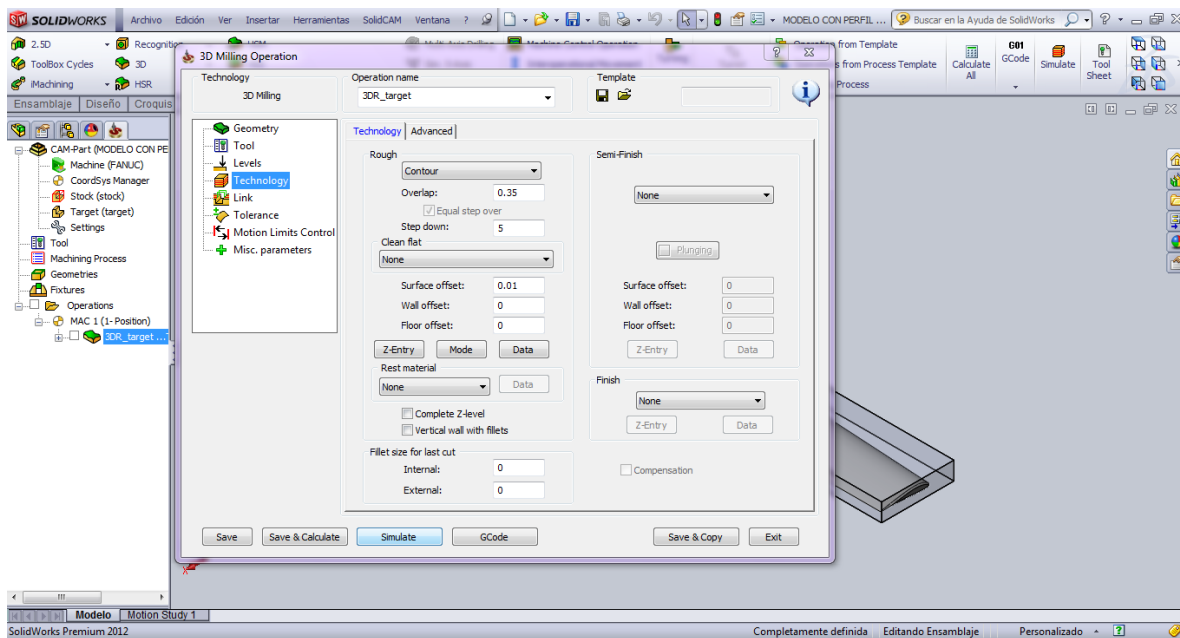


Figura 263. Guardar y Calcular operación.



Inmediatamente después de hacer clic en **Simulate**, aparecerá una ventana de simulación, por defecto aparecerá en **Host CAD**, se hace clic en **Play** (Figura 264.).

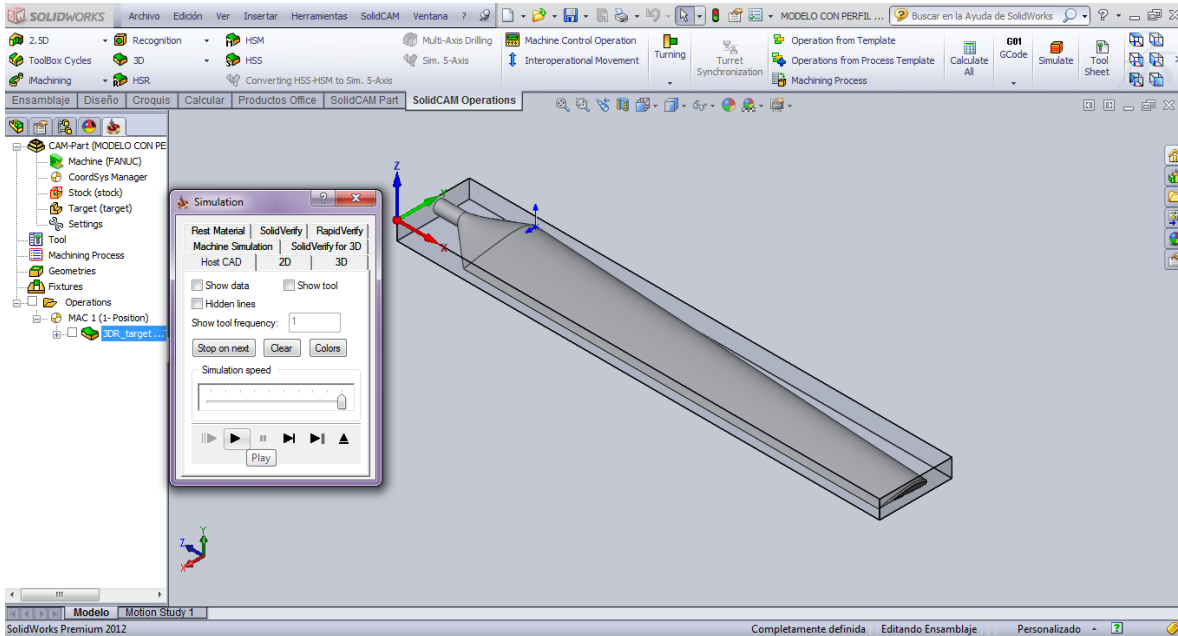


Figura 264. Simulación del mecanizado.

Aparecerán líneas de color amarillo, las cuales representan las trayectorias de la herramienta en el mecanizado (Figura 265.).

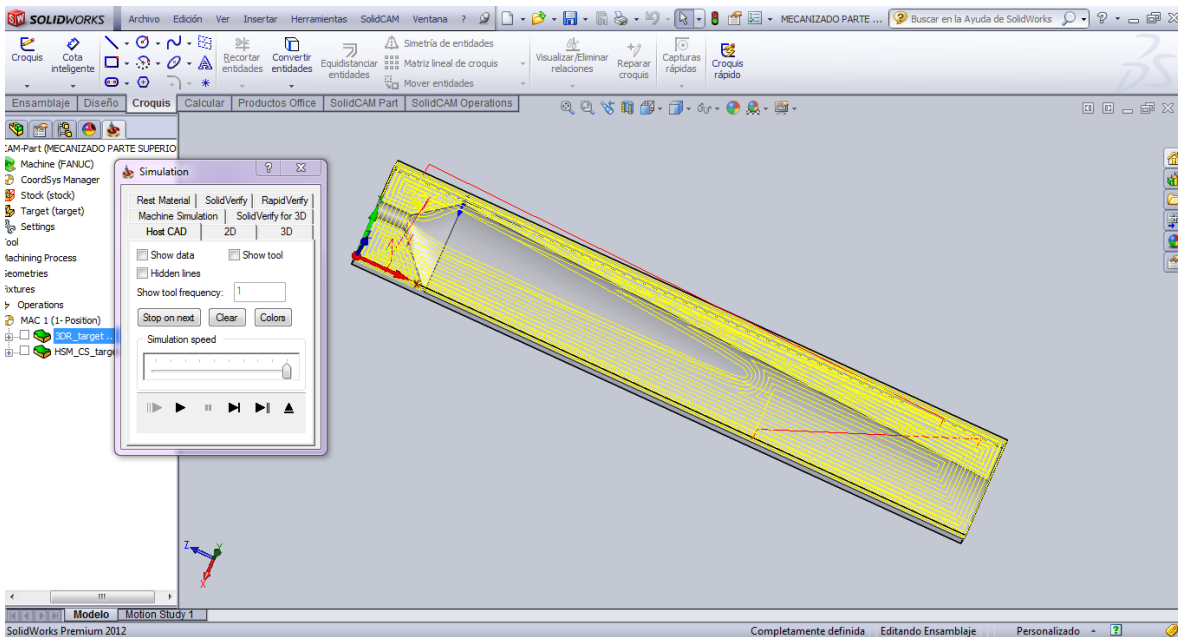


Figura 265. Trayectorias de la herramienta en la operación de 3D Milling.

Se cierra la ventana de simular. Aparecerá de nuevo la ventana de la operación de desbaste, se hace clic en **GCode** para generar el programa CNC (**Figura 266.**).

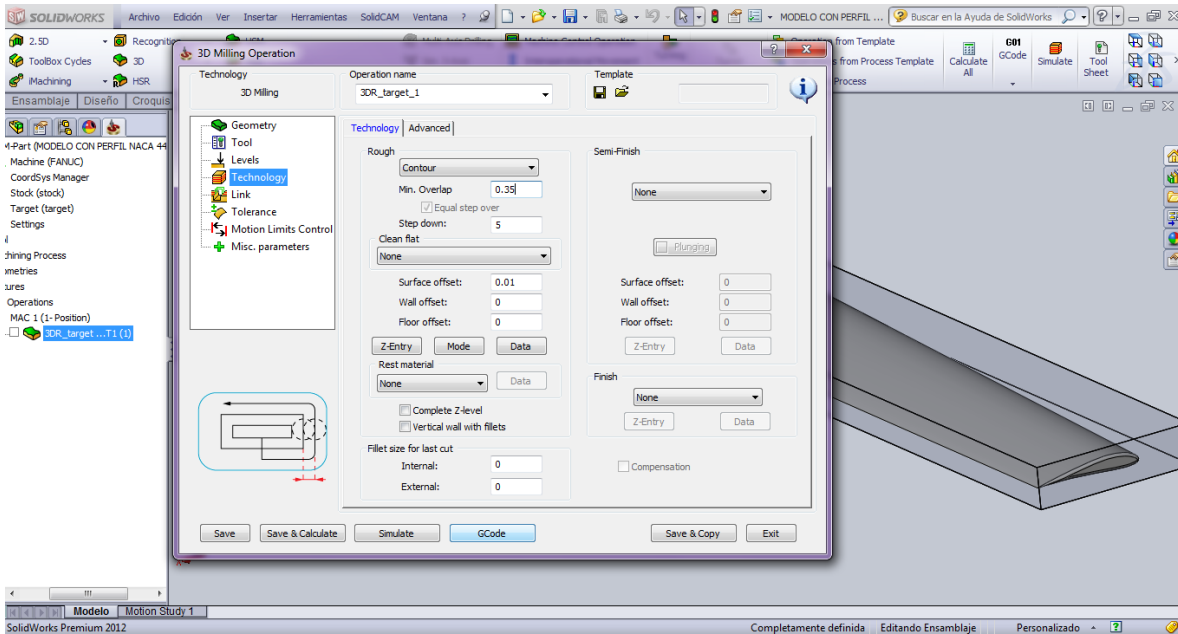


Figura 266. Generar código

Aparece un archivo de texto, el cual contiene todas las operaciones para el mecanizado de la parte superior del modelo. Este programa no funcionará al ser cargado en la memoria del control **FAGOR**, ya que previamente se seleccionó **FANUC** en la parte de **CNC-Machine**, en el programa **SolidCAM**. Para que se ejecute sin problemas se le debe realizar algunas modificaciones.

Lo primero es reemplazar la cabecera de bloque (**Figura 267.** y **Figura 268.**)

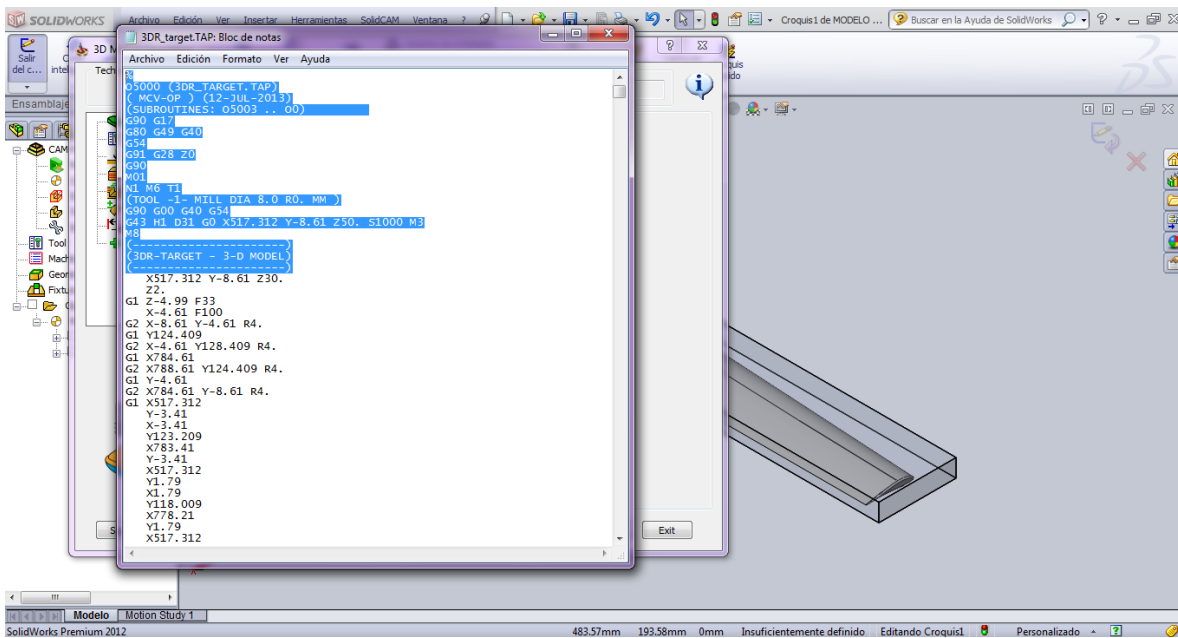


Figura 267. Cabecera de programa predeterminedada para control FANUC

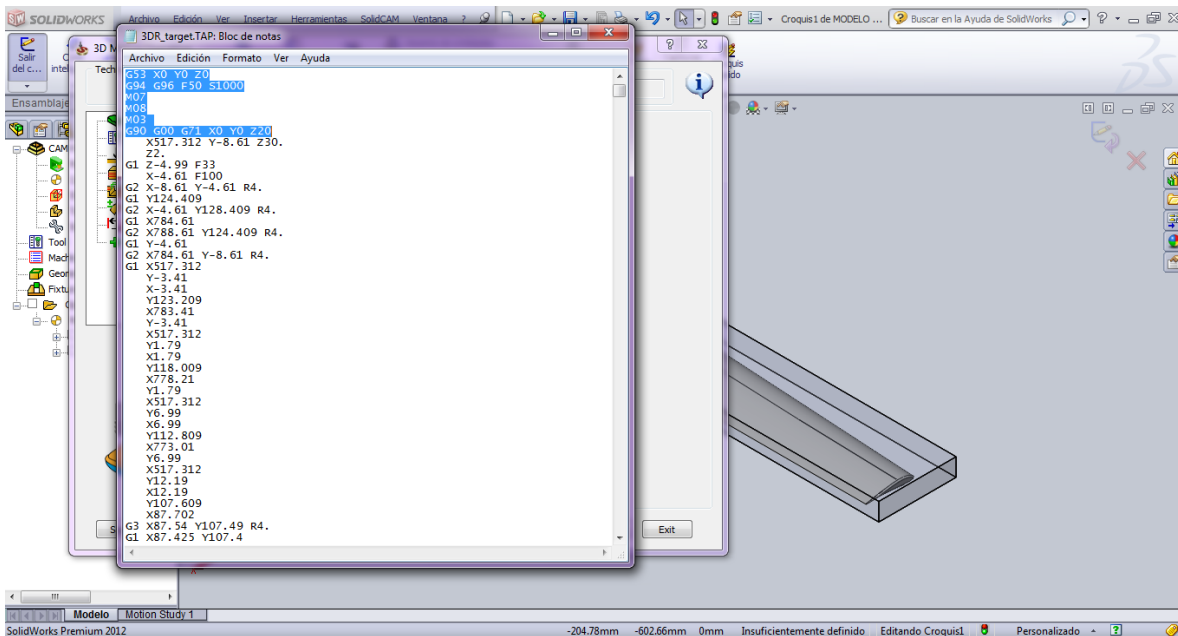


Figura 268. Cabecera de programa para control FAGOR.

Lo siguiente es modificar los valores de **F** (Velocidad de avance de la herramienta) y **S** (Velocidad del husillo), como el material a trabajar es madera se puede modificar estos valores, siendo **F 1200** y **S 3000** (Figura 269.).

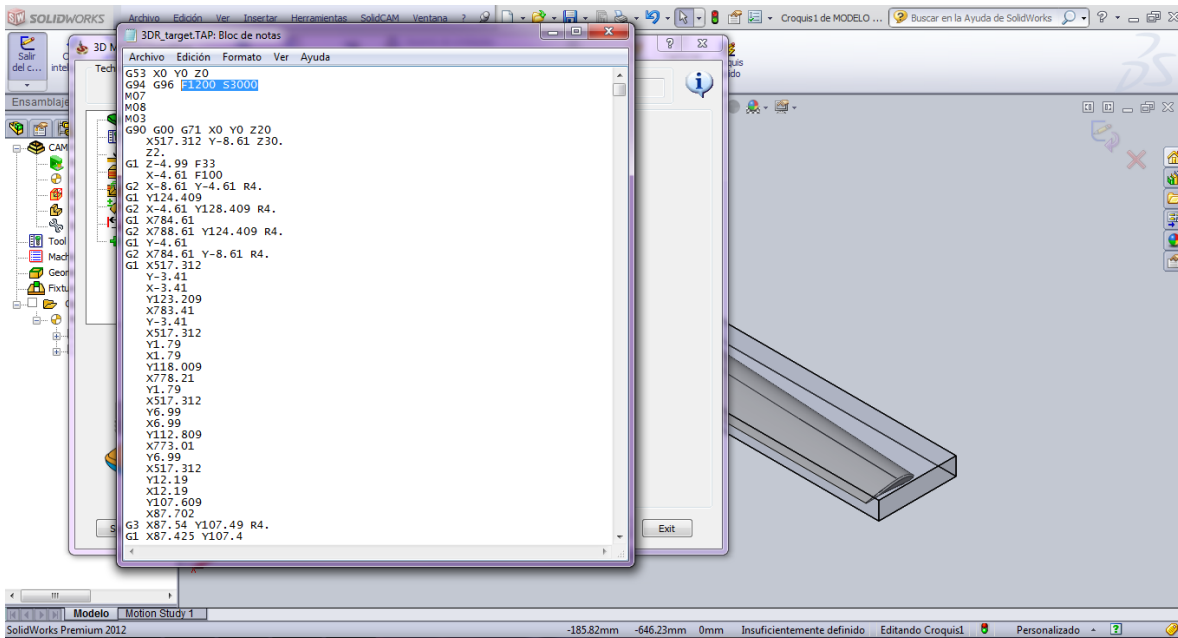


Figura 269. Modificación de F (velocidad de avance) y S (Velocidad de giro del husillo)

Dado que el programa es extenso, las modificaciones al parámetro F son numerosas, por esto, se utiliza la herramienta **Reemplazar** del **Bloc de notas**, se hace clic en **Edición/Reemplazar** (Figura 270.).

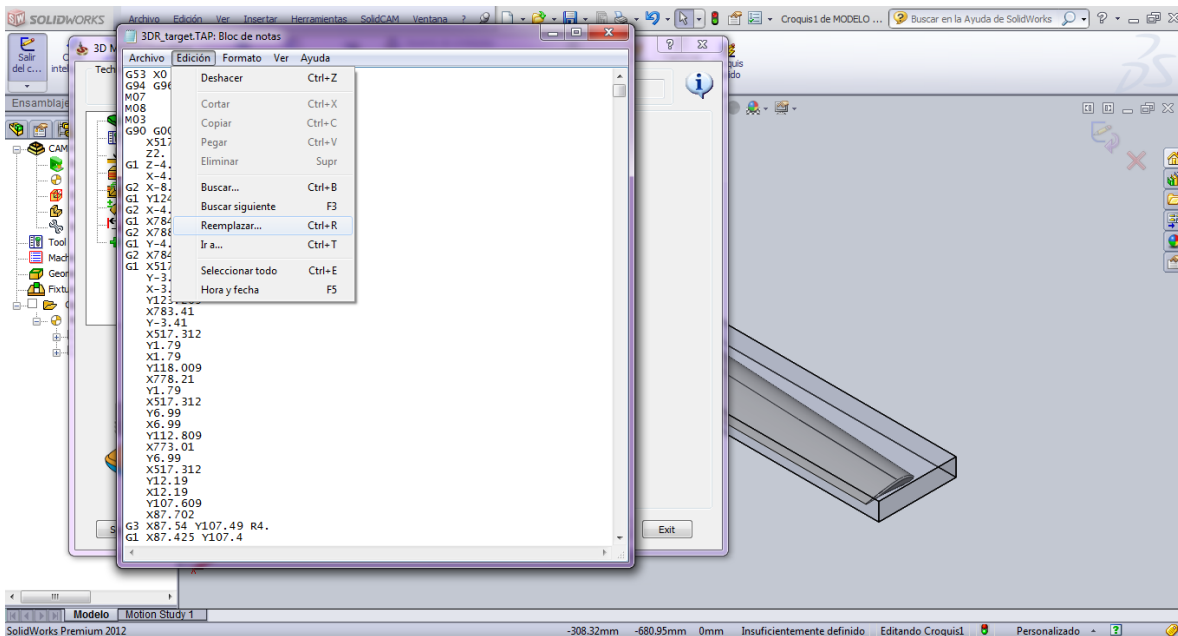


Figura 270. Reemplazar valores de F.

Aparecerá una ventana en la cual se introduce el texto a Buscar y el texto con el cual se reemplazará, en este caso **F** tendrá un valor por defecto de **100**, el cual se reemplazará por el valor de **1200** (**Figura 271.**).

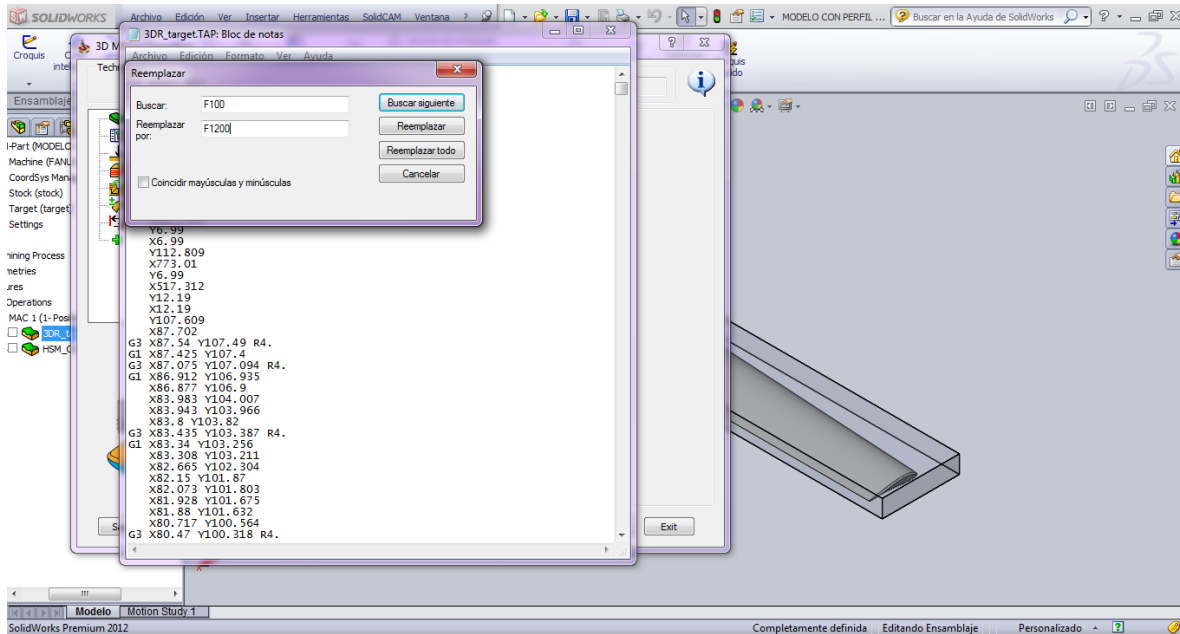


Figura 271. Modificación del parámetro F.

Seguidamente, se guardará el archivo de texto con el programa para el mecanizado como un archivo con extensión (**.PIM**), el cual podrá ser almacenado en la memoria de la Fresadora y luego ejecutado sin problemas. Para esto se hace clic en **Archivo/Guardar como** (**Figura 272.**).

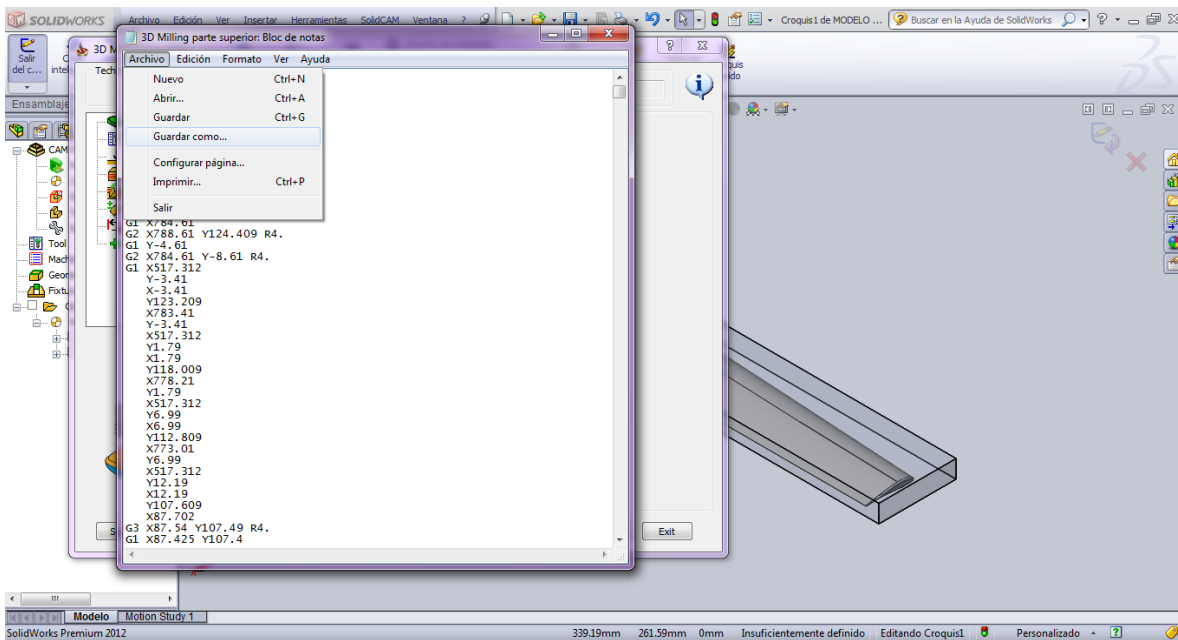


Figura 272. Guardar archivo de programa como archivo tipo PIM.

Luego en tipo de archivo se selecciona **Todos los archivos**, y luego del nombre del archivo se agrega la extensión (**.PIM**) (Figura 273.).

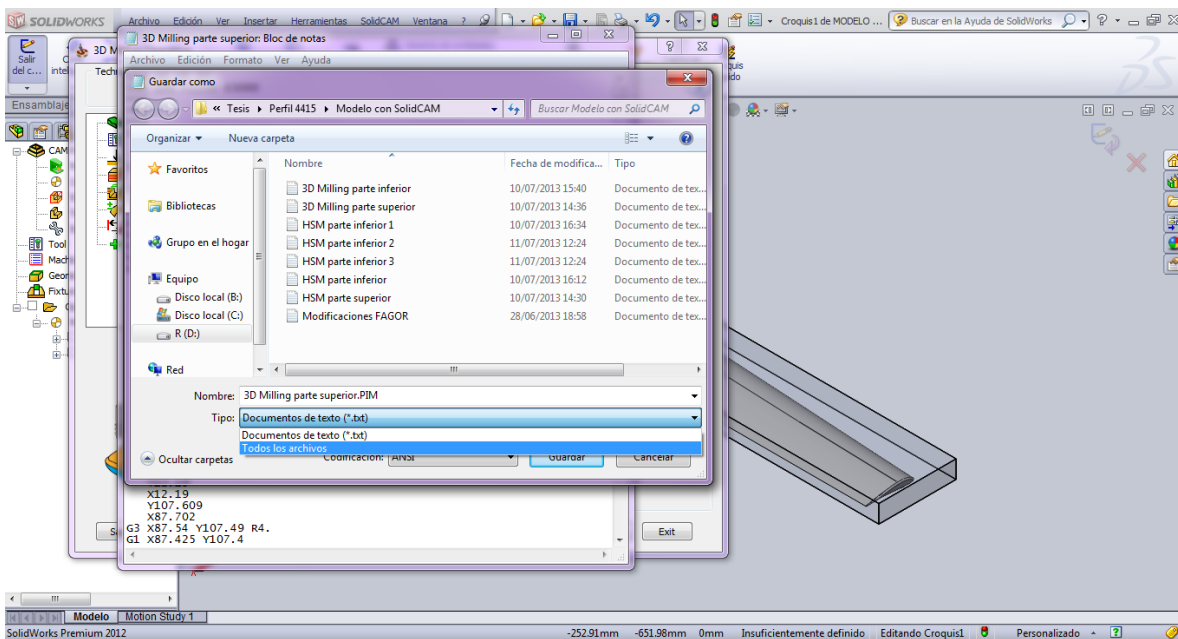


Figura 273. Modificación de la extensión del archivo de programa.

3.2.La siguiente operación que se realizará es la de acabado (**HSM**).

Para esto se hace clic en **HSM** en la pestaña de **SolidCAM Operations** (Figura 274.).

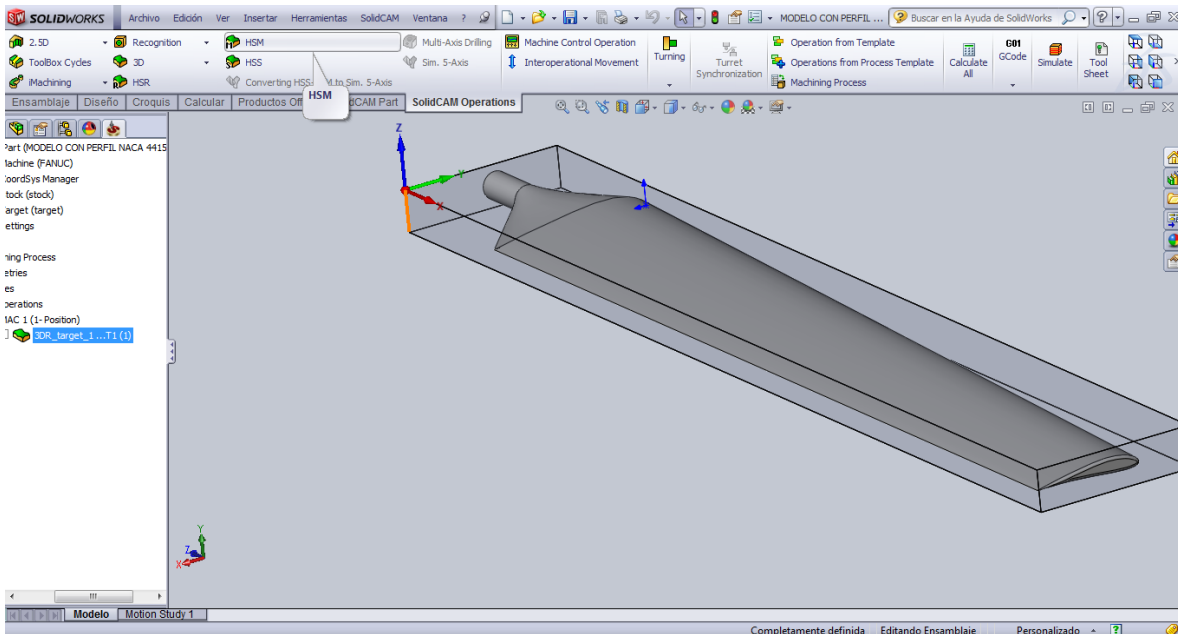


Figura 274. Definiendo la operación de acabado (HSM)

Aparecerá una ventana, en la cual se escoge como tecnología (**Technology**), **3D Constant step over** (Figura 275.).

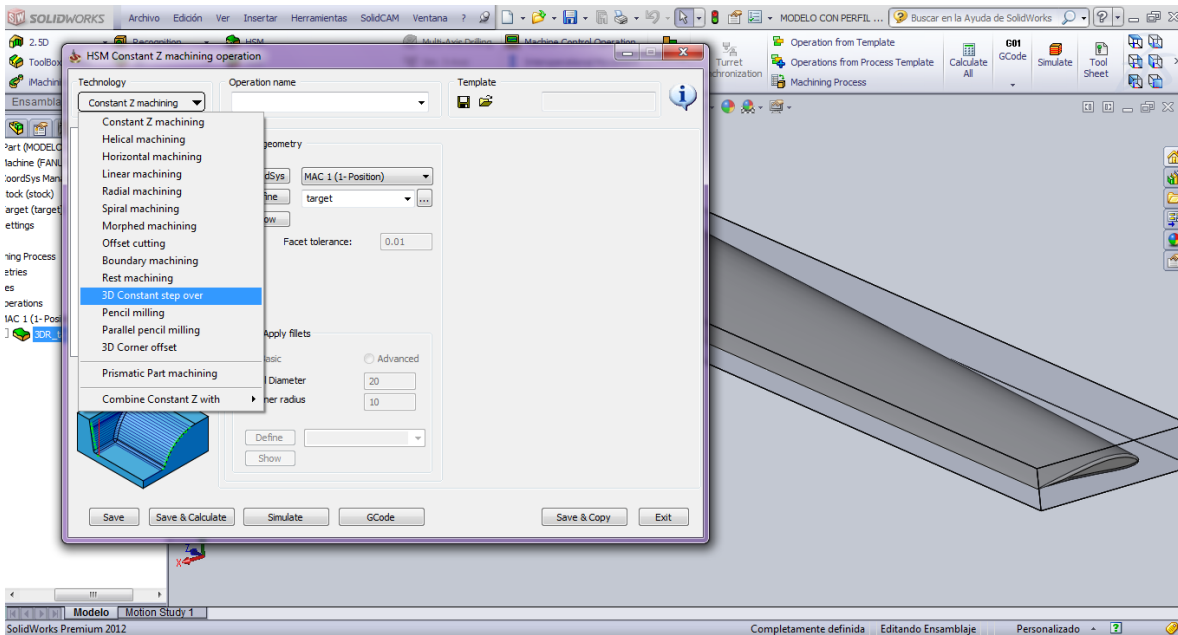


Figura 275. Seleccionar tipo de tecnología para la operación.

Una vez seleccionado el tipo de tecnología, se procede a seleccionar la herramienta (**Tool**) (Figura 276.).



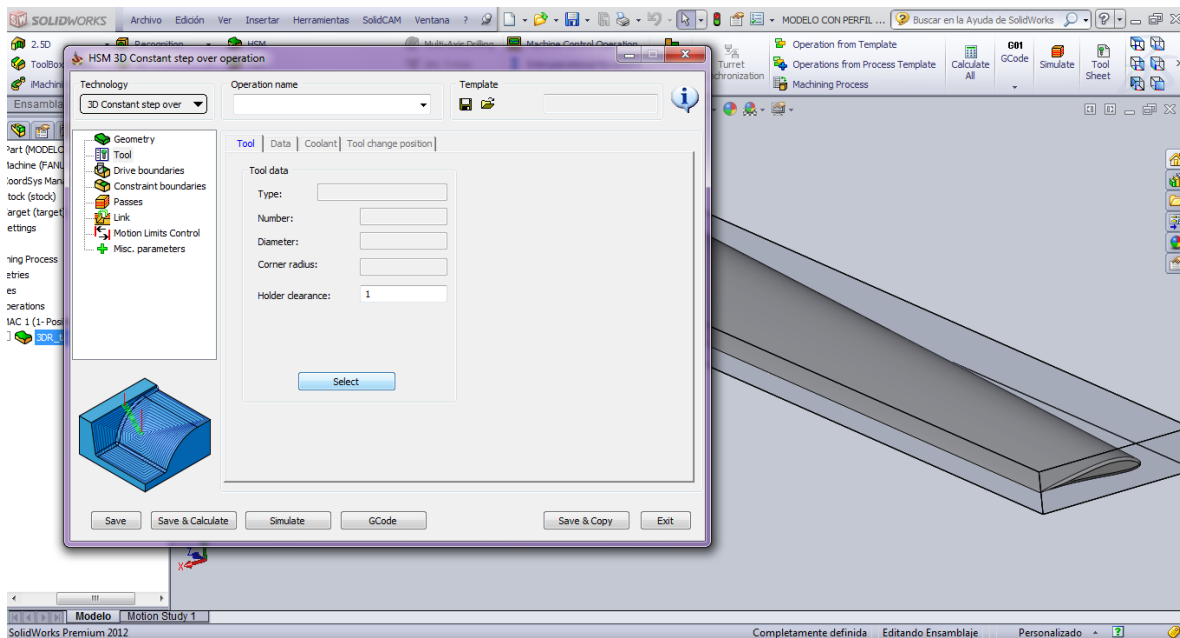


Figura 276. Escoger Herramienta

Aparecerá la herramienta que se utilizó en la operación de **Desbaste**, se selecciona nuevamente (**Figura 277.**).

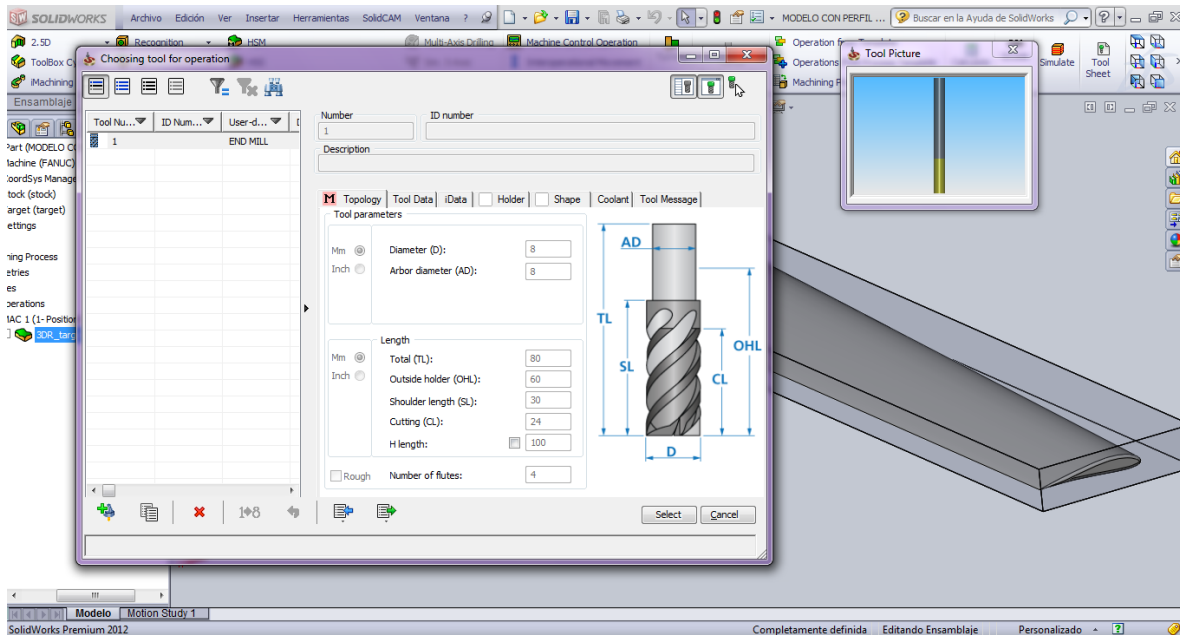


Figura 277. Escoger herramienta.

Lo siguiente es determinar la profundidad para el acabado, se hace clic en **Passes** (pasadas), se puede elegir los niveles de acuerdo a las dimensiones del modelo o de la materia prima, en este caso se hace clic en **stock** (materia prima) (**Figura 278.** Y **Figura 279.**).



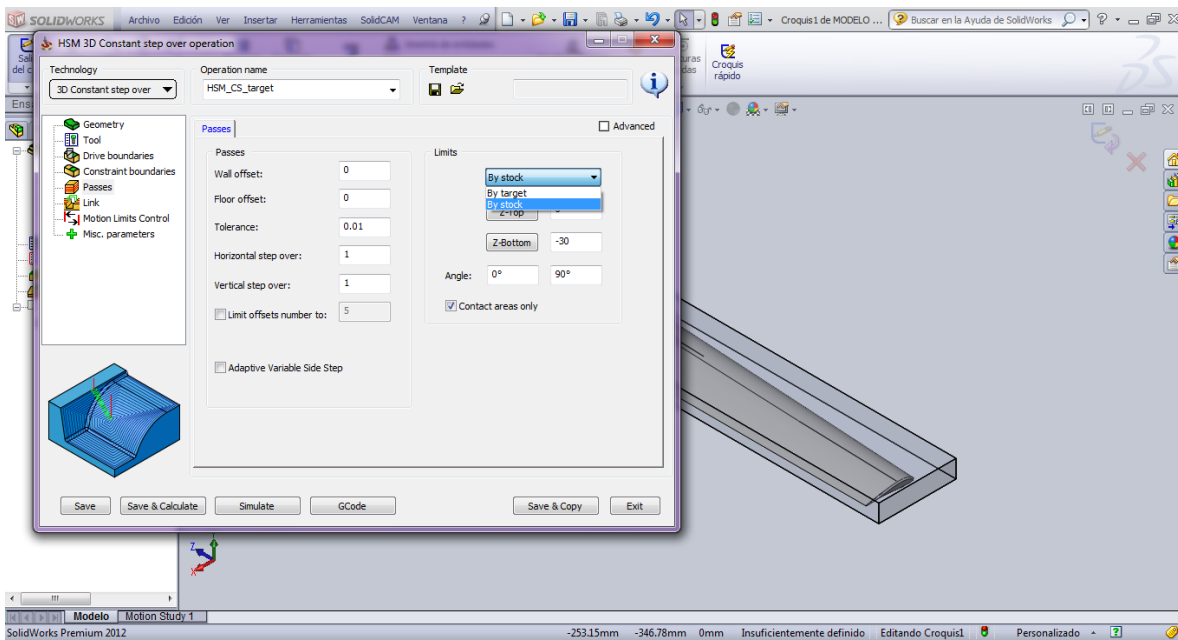


Figura 278. Determinar Passes.

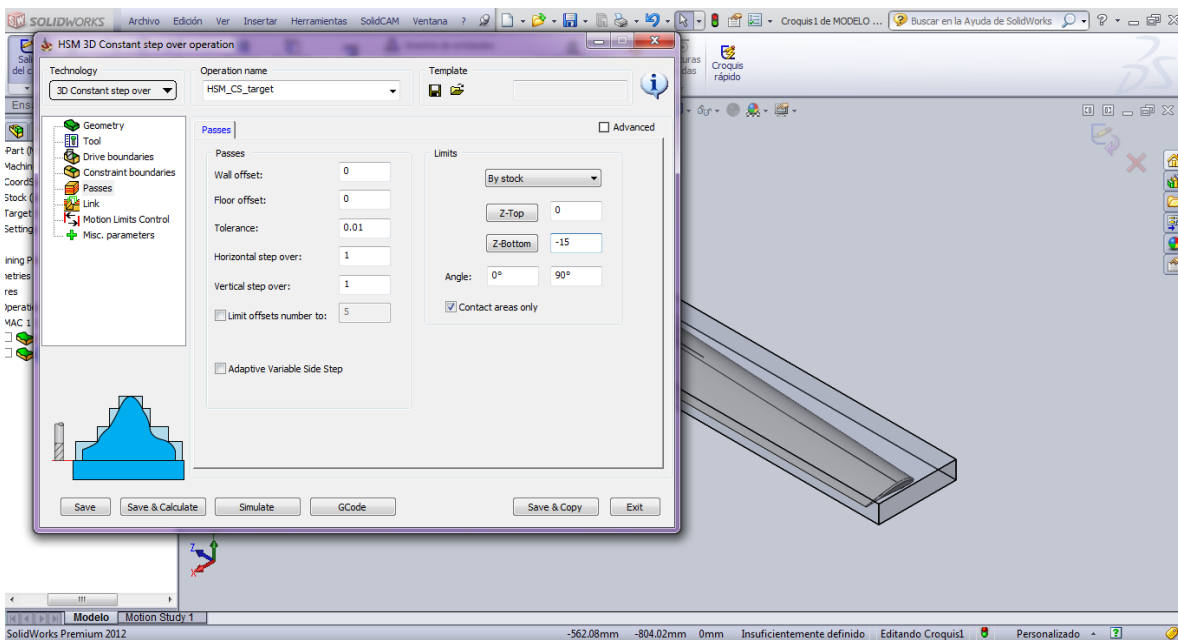


Figura 279. Determinar Passes.

Al finalizar la edición de la operación acabado, se hace clic en **Save & Calculate** (Figura 280.).

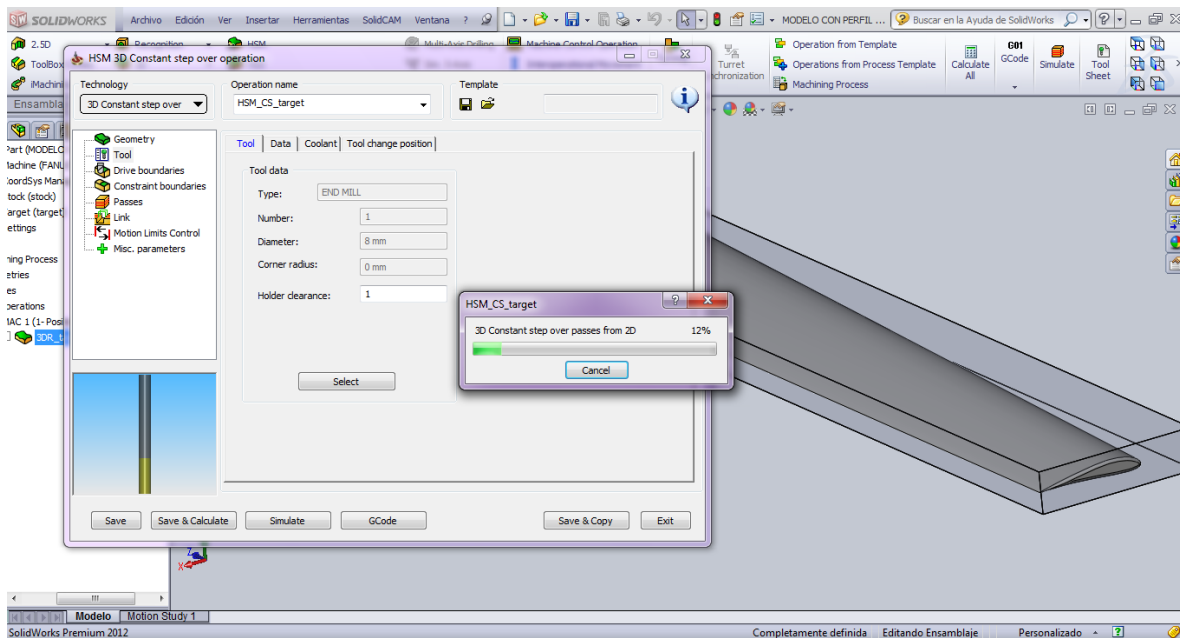


Figura 280. Guardando y calculando la operación de acabado.

Luego se hace clic en **simúlate** para visualizar las trayectorias de la herramienta en esta operación de mecanizado (**Figura 281**).

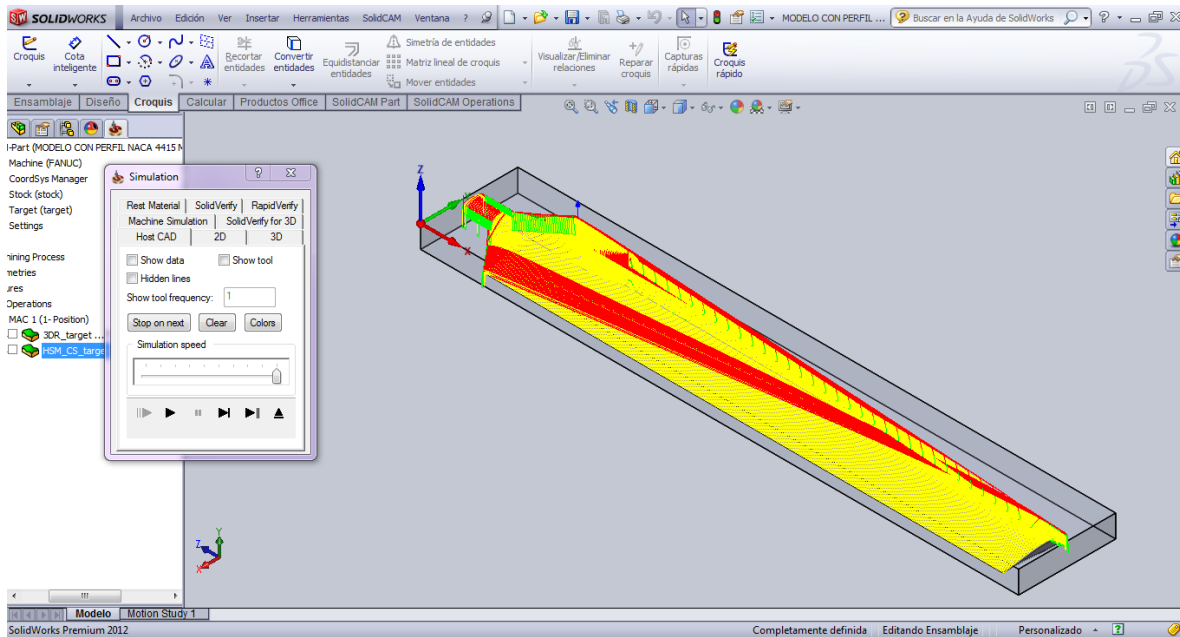


Figura 281. Trayectorias de la herramienta para la operación de acabado (HSM).

Finalmente se debe generar el programa **CNC** para cargarlo en la fresadora y poder mecanizar. Se procede a editarlo de la misma manera que se realizó con el programa para la operación de desbaste. Luego de eso la modificación adicional del programa está

relacionada con la Funciones **G2** y **G3** (interpolación circular (helicoidal) derecha e izquierda respectivamente), ya que por defecto **R1**. En las líneas de programa correspondientes a las funciones **G2** y **G3**, se encuentra escrito luego de la coordenada **Z**, y por esto genera conflictos a la hora de simular y ejecutar el programa en la fresadora (**Figura 282.** y **Figura 283.**). Luego de esto se guarda el archivo de texto añadiendo la extensión (**.PIM**) como se efectuó con el programa en la operación de desbaste.

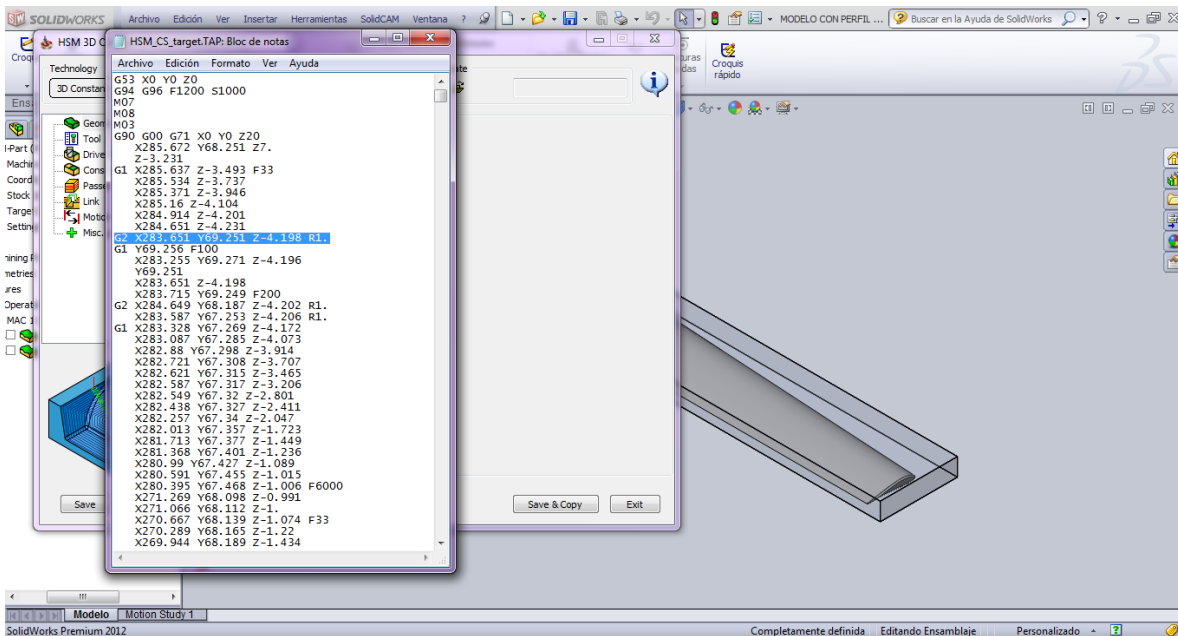


Figura 282. Edición de líneas de programa que generan conflictos.

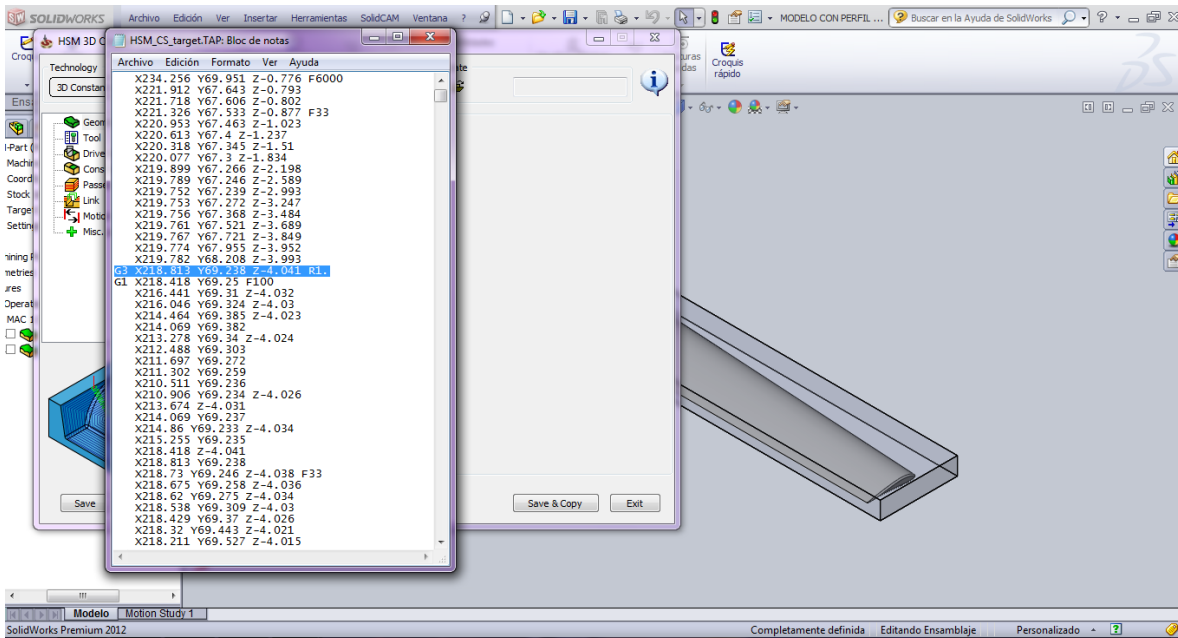


Figura 283. Edición de líneas de programa que generan conflictos.

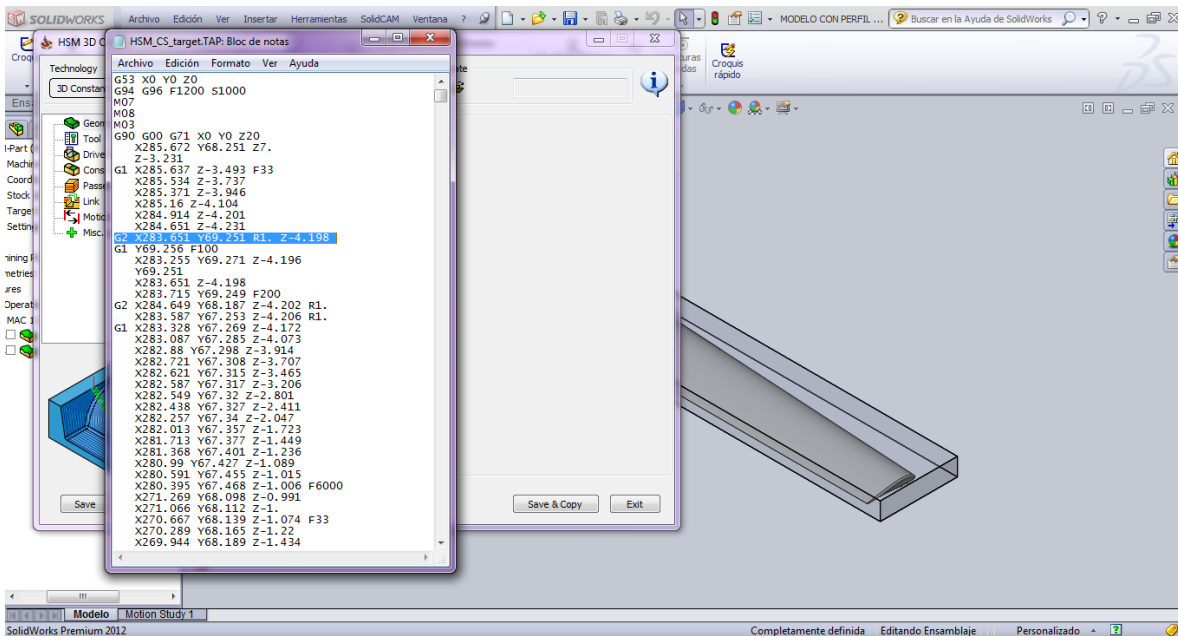


Figura 284. Edición de líneas de programa que generan conflictos.

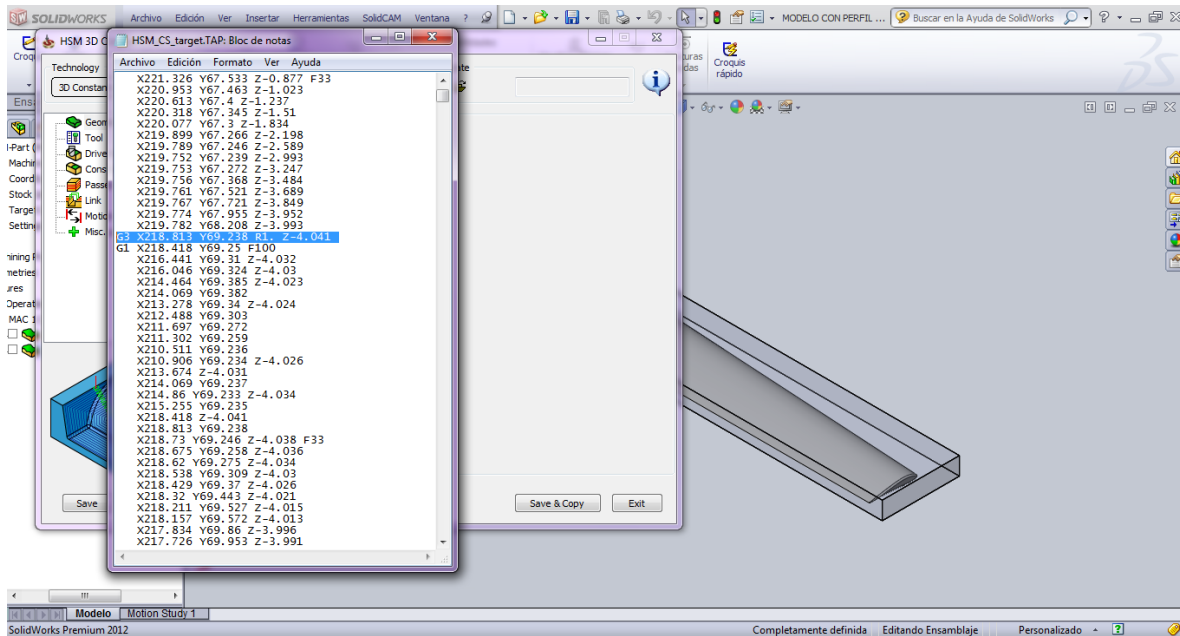


Figura 285. Edición de líneas de programa que generan conflictos.

4. Para finalizar se define las operaciones de mecanizado para la parte inferior del modelo.

Lo primero es abrir el modelo creado en **SolidWorks**, y luego se crea un **New Milling**, de igual forma como se procedió para la parte superior (**Figura286**).

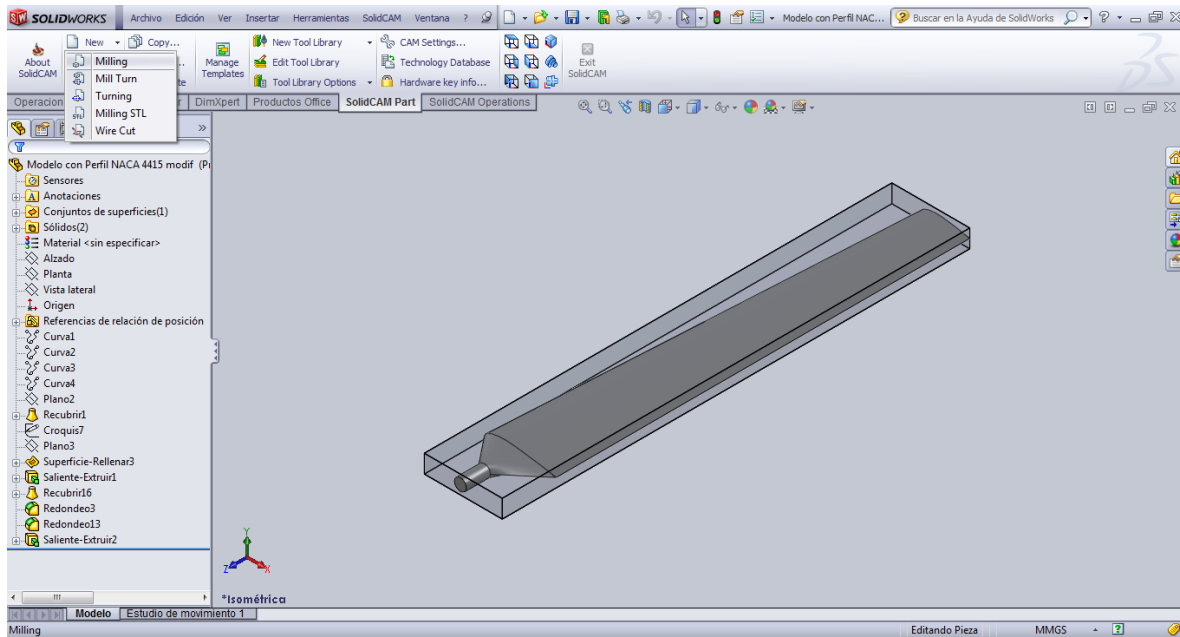


Figura 286. Crear nuevo Milling (Fresado)

Aparecerá la ventana en la cual se edita el nombre del archivo **SolidCAM** y se ubica el directorio para guardar el mismo (**Figura 287.**).

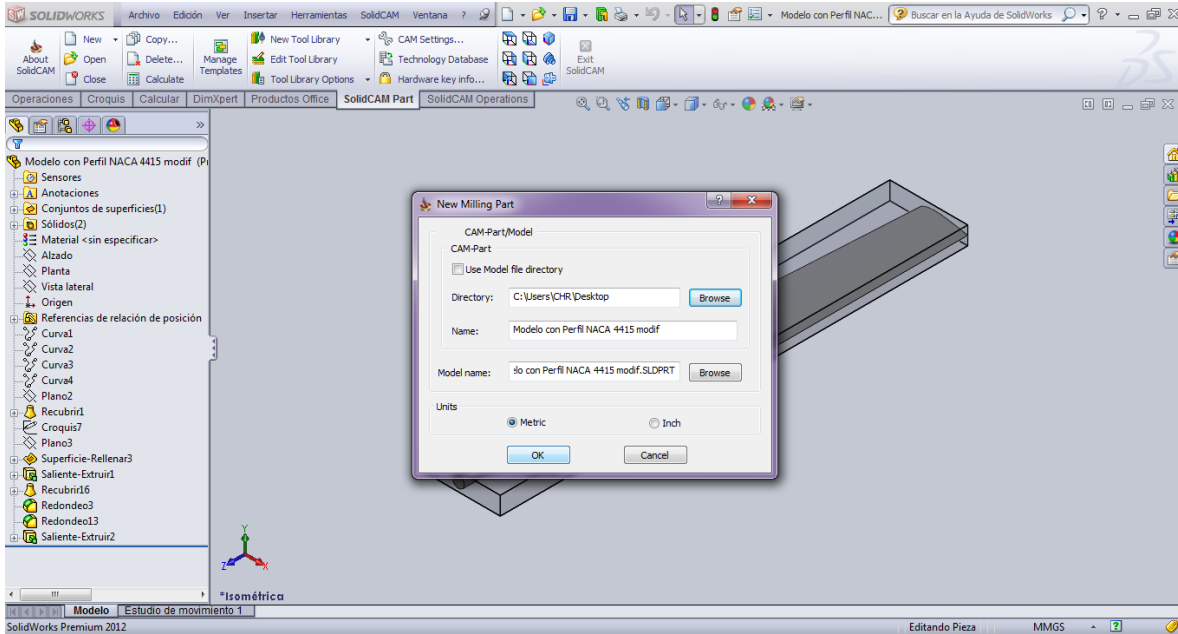


Figura 287. Guardar archivo SolidCAM.

De igual manera que para la parte superior se escoge **FANUC** como **CNC-Machine** (**Figura 288.**).

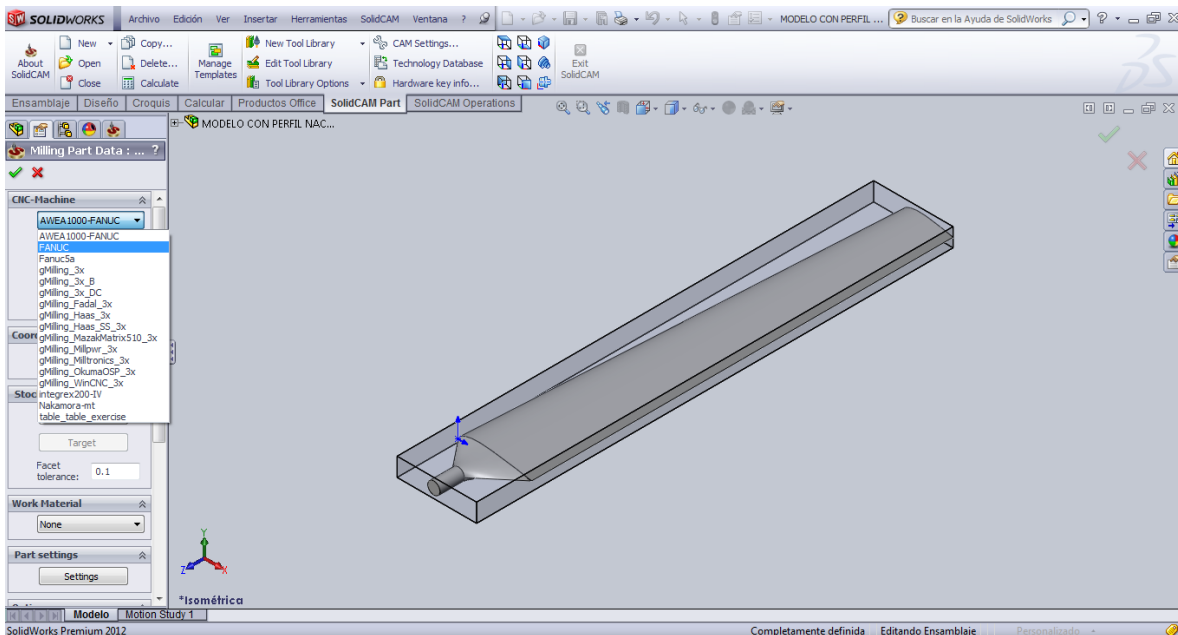


Figura 288. Definir CNC-Machine.

Seguidamente se define el sistema de coordenadas (**Figura 289.** - **Figura 299.**).

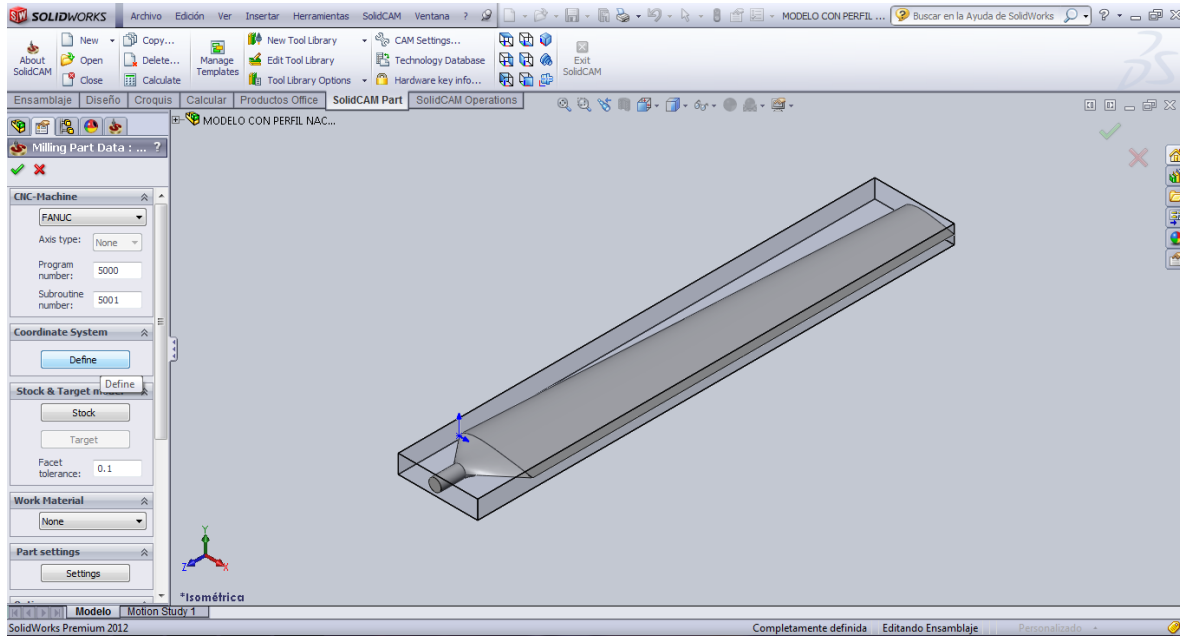


Figura 289. Definir sistema de coordenadas.

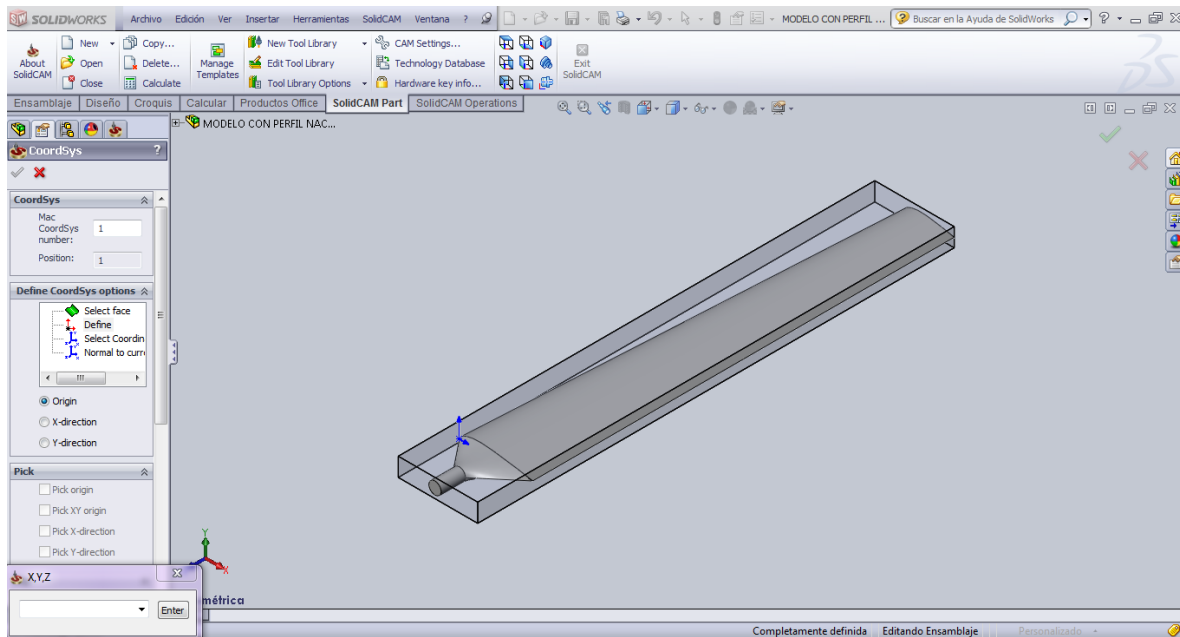


Figura 290. Definir sistema de coordenadas.

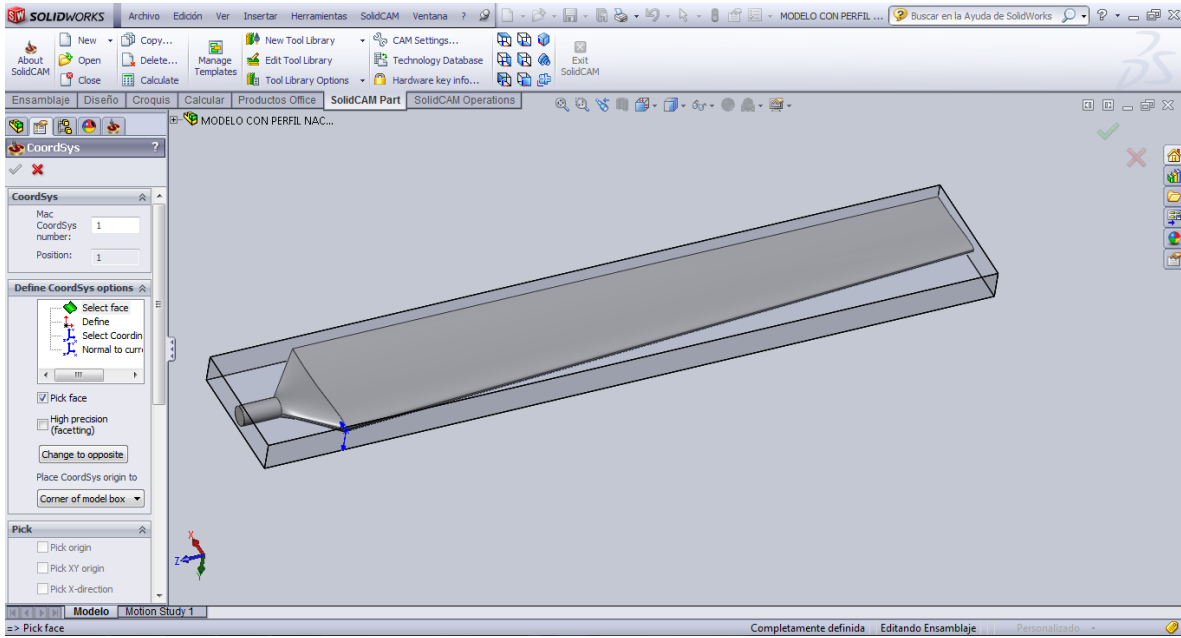


Figura 291. Definir sistema de coordenadas

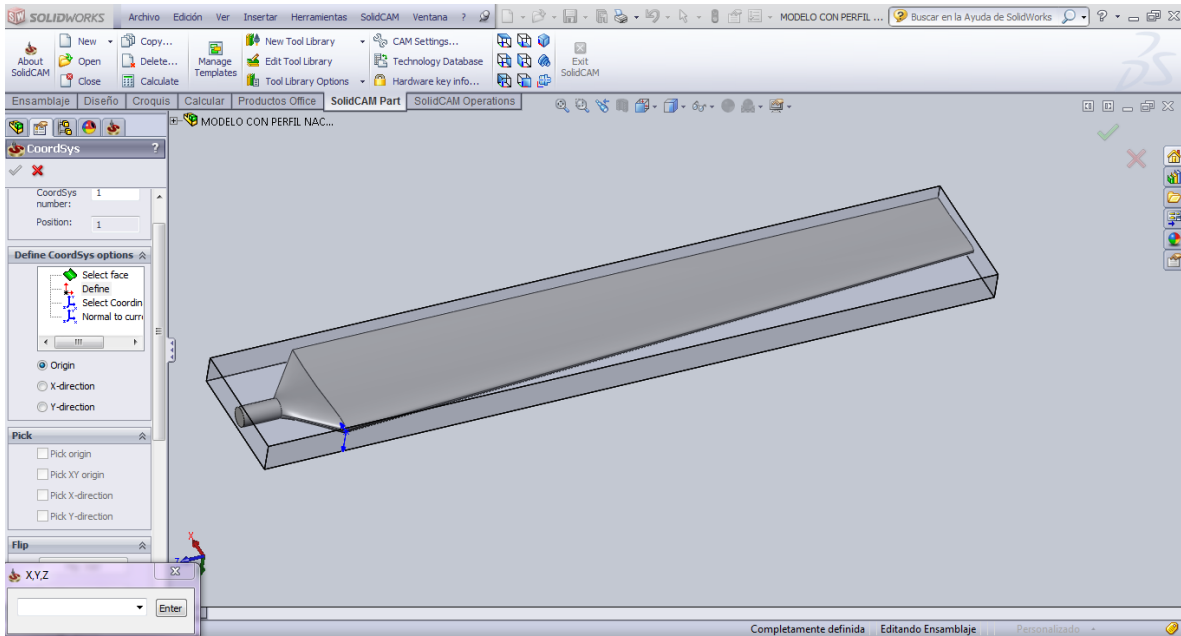


Figura 292. Definir sistema de coordenadas



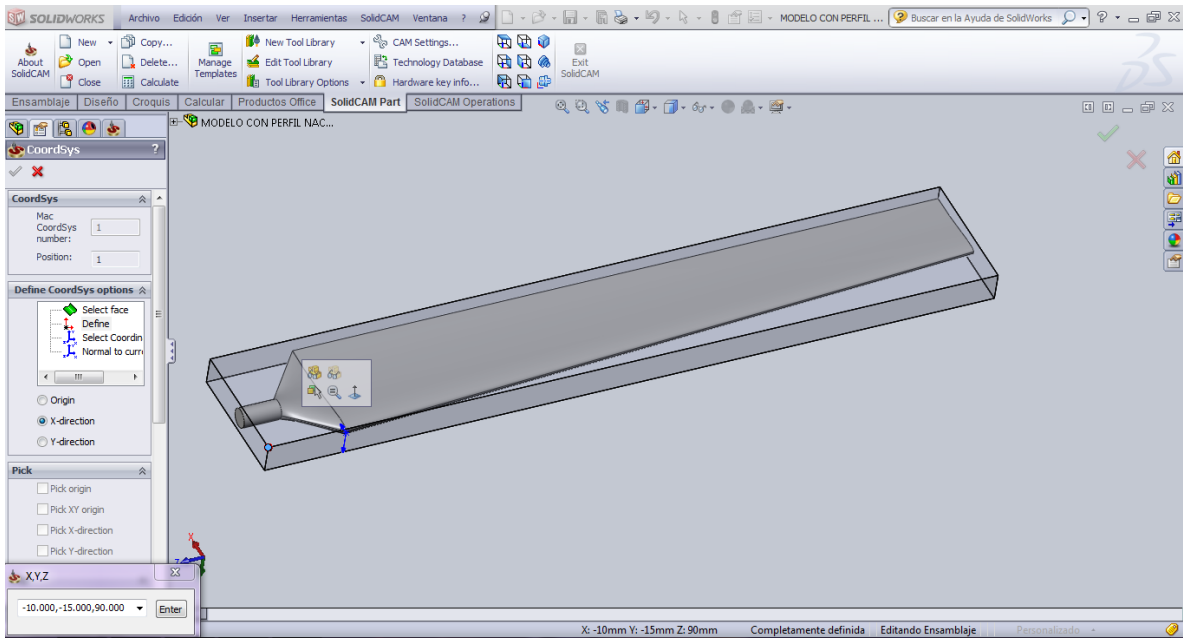


Figura 293. Definir sistema de coordenadas

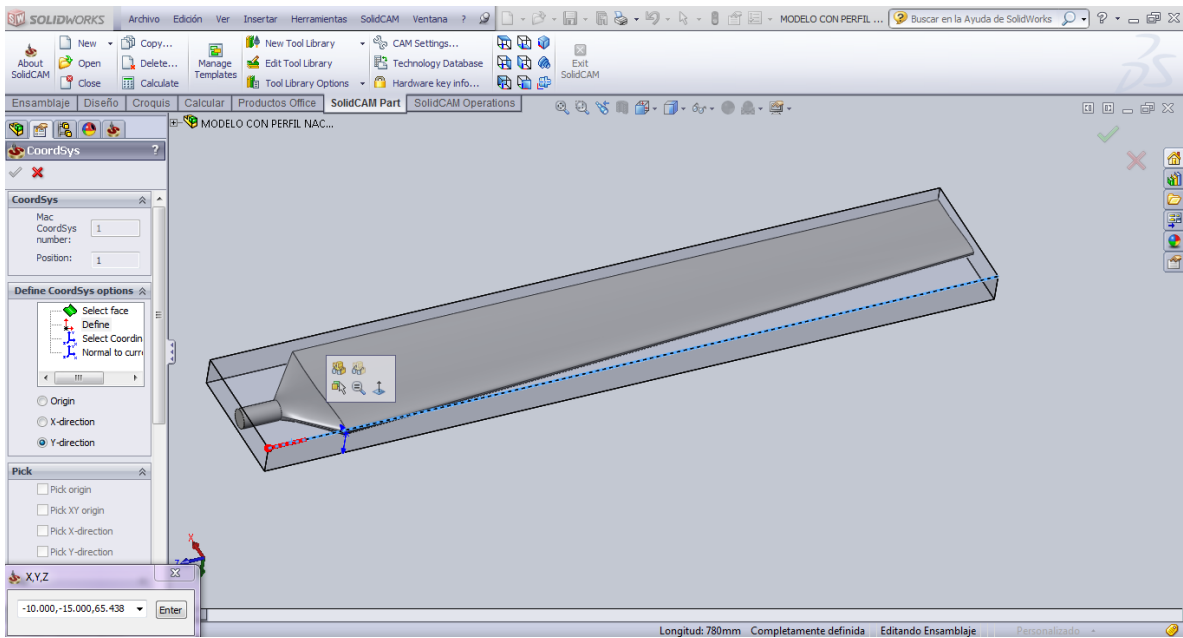


Figura 294. Definir sistema de coordenadas.

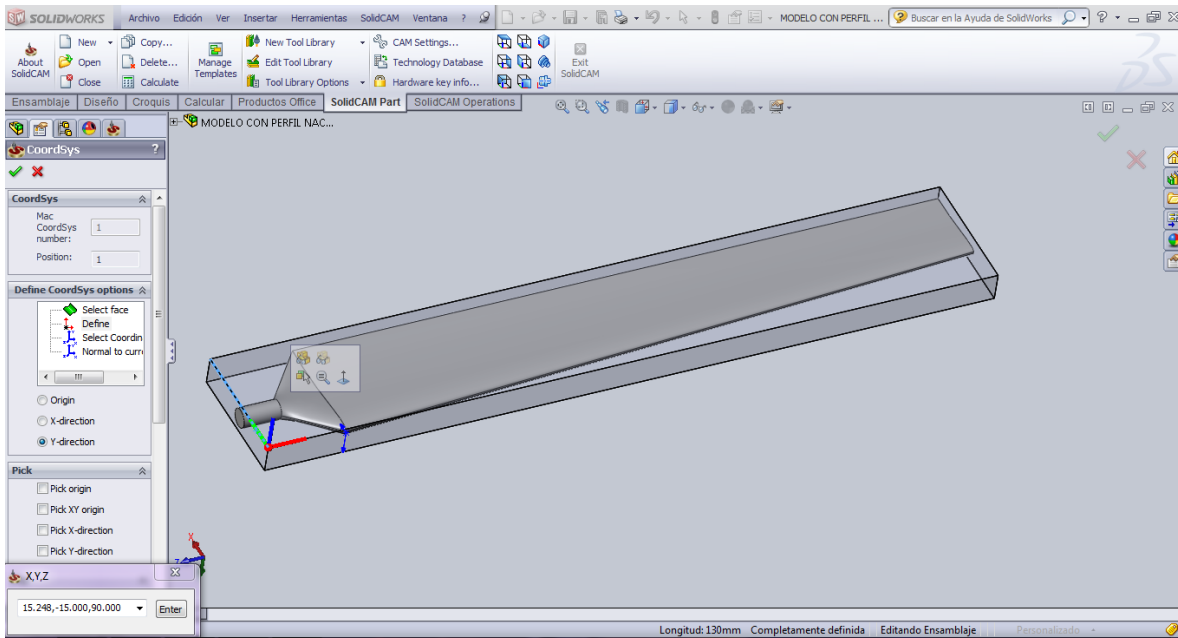


Figura 295. Definir sistema de coordenadas.

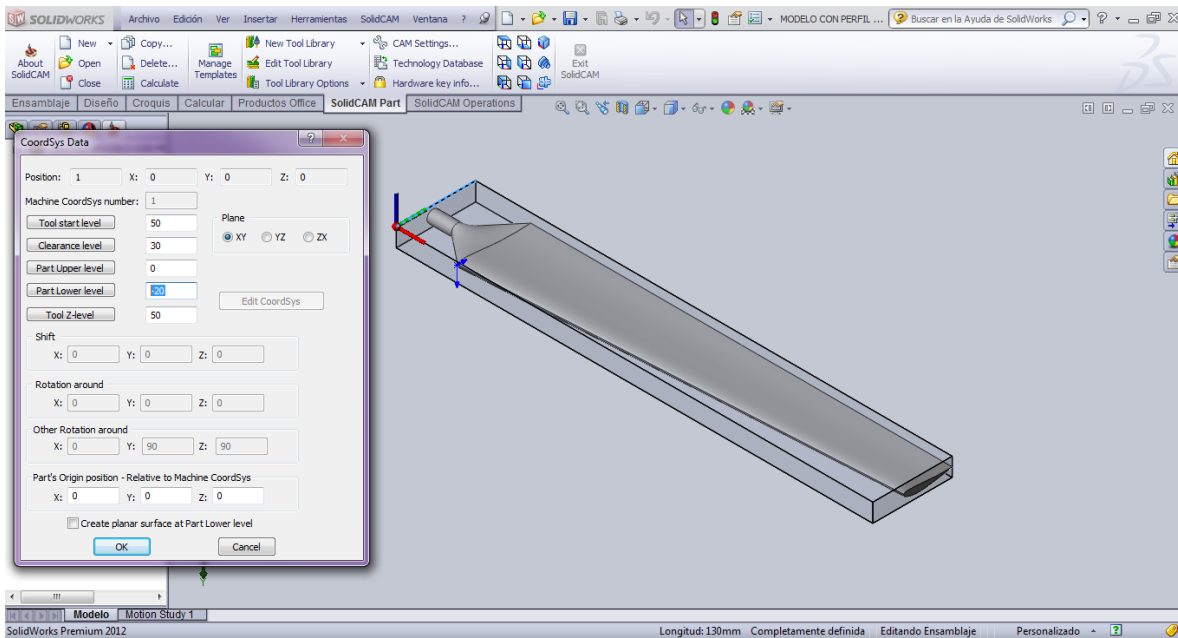


Figura 296. Definir sistema de coordenadas.

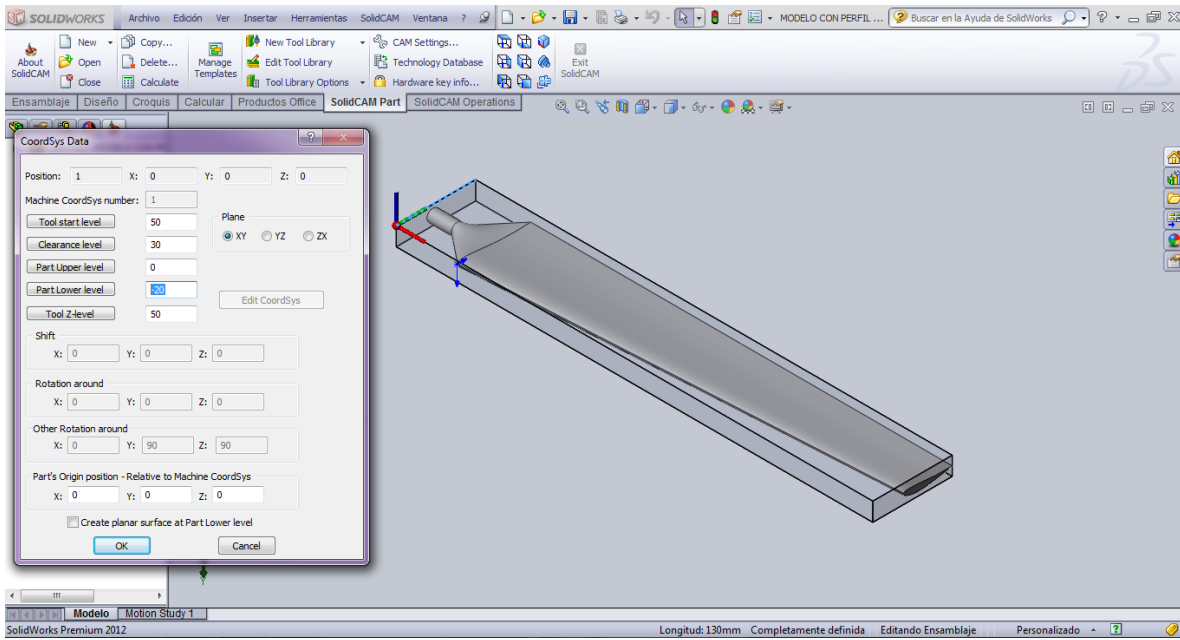


Figura 297. Definir sistema de coordenadas.

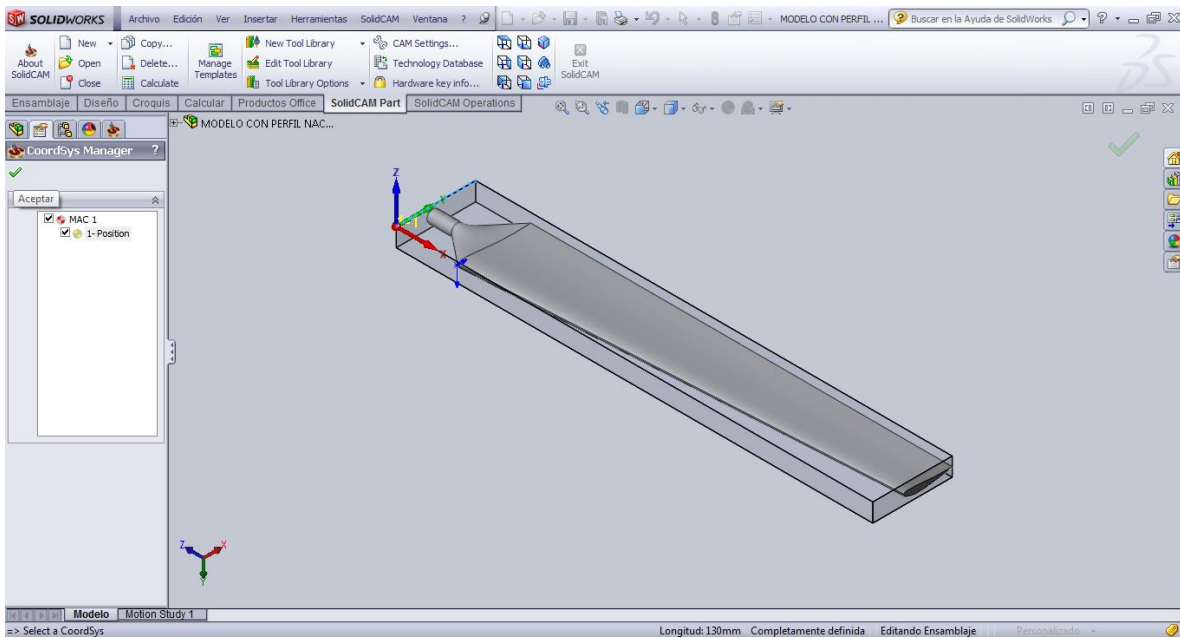


Figura 298. Definir sistema de coordenadas.

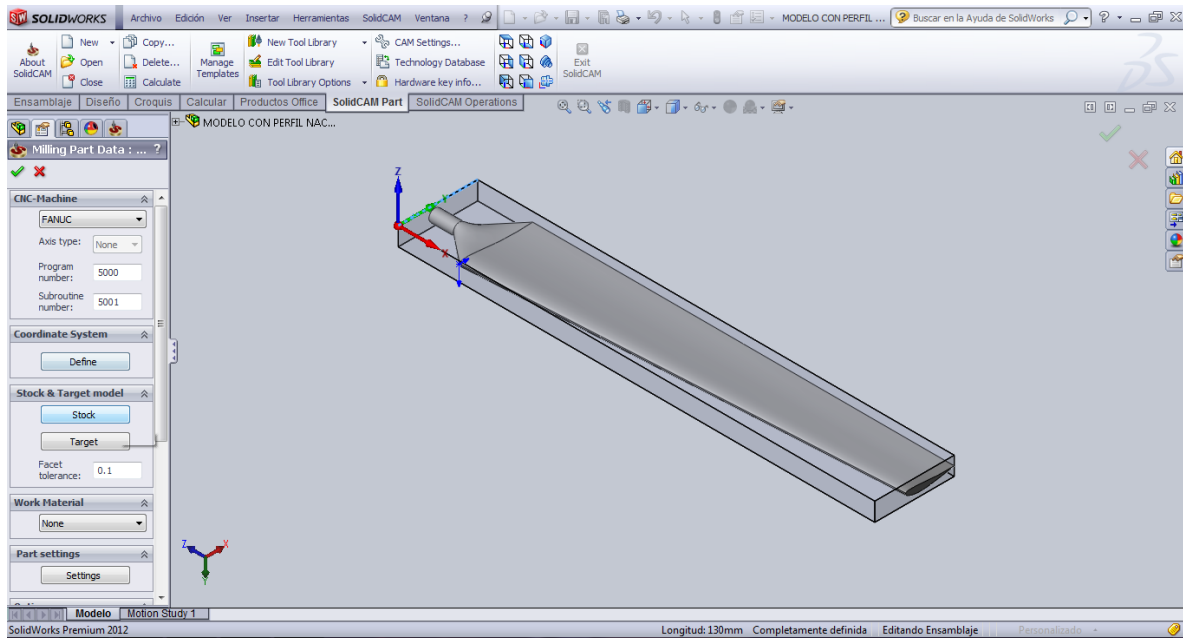


Figura 299. Definir sistema de coordenadas.

Desde aquí, los pasos para definir la materia prima (**Stock**), el modelo a mecanizar (**Target**), la operación de desbaste (**3D Milling**) y la de acabado (**HSM**), son idénticos a los pasos que se realizó para el mecanizado de la parte superior.

Al concluir esta parte de simulación del mecanizado, se tienen los programas del desbaste y acabado del modelo, tanto de la parte superior e inferior del mismo.

## 6. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO (Fresadora Travis M5 con CONTROL CNC FAGOR 8055M)

Para ejecutar los programas obtenidos con el software **SolidCAM**, y así obtener el modelo de pala en cuestión, se utilizó la **Fresadora CNC del Taller Mecánico de la UNL**, Marca **Travis**, Modelo **M5** con control **CNC FAGOR 8055M**.

Para lo cual se realizó lo siguiente:

### 6.1. DESCRIPCIÓN BREVE DEL EQUIPO

Lo primero que se debe hacer es identificar las principales partes del equipo y conocer sus funciones.

#### TABLERO DE CONTROL



Figura 300. Vista Frontal

Botón de seguridad



Figura 301. Vista lateral derecha

Volante



Figura 302. Vista lateral izquierda

## FRESADORA



Figura 303. Vista Frontal

### 6.2. ENCENDIDO DEL EQUIPO Y OPERACIONES DE RUTINA

#### - Encendido:

A continuación se enciende el Equipo, para esto, se presiona el botón verde ubicado en la parte inferior izquierda del tablero de control(Figura 304.).



Figura 304. Encender el equipo.

Acto seguido se iluminará el botón de encendido y se encenderá la pantalla del tablero(Figura 305.y Figura 306.).





Figura 305. Encender el equipo.



Figura 306. Pantalla inicial del tablero de control.

Seguidamente se activa el botón de seguridad ubicado en la parte lateral derecha del tablero de control(Figura 307.).





Figura 307. Encender el equipo.

Luego de esto el botón se iluminará indicando que el bloqueo de seguridad ha sido deshabilitado (**Figura 308.**).



Figura 308. Encender el equipo.

- **Insertar posición actual del cambiador de herramientas**

Después de encender el equipo, se debe insertar la posición actual del cambiador de herramienta. Para esto se presiona la tecla **F7 (+)** del tablero de control (**Figura 309.**).



Figura 309. Insertar posición actual de cambiador

Luego se presiona **F5 (USUARIO)**(Figura 310.).



Figura 310. Insertar posición actual de cambiador

Aparecerá un mensaje indicando que se ingrese la posición actual de cambiador (**Figura 308.**).



Figura 311. Insertar posición actual de cambiador

Se debe observar el número de posición que está justo al lado del husillo (**Figura 312.**).



Figura 312. Insertar posición actual de cambiador

En este caso es el número 10 (**Figura 313.**).



Figura 313. Insertar posición actual de cambiador

Así que con el teclado numérico se ingresa el número 10 (**Figura 314.y Figura 315.**).

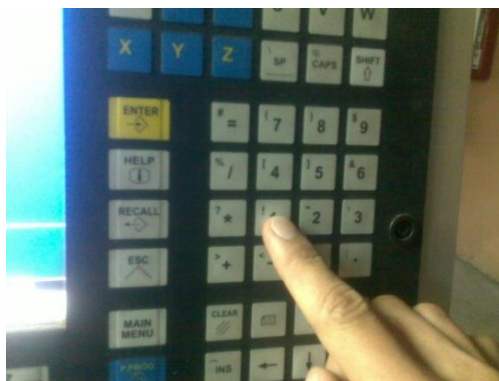


Figura 314. Insertar posición actual de cambiador

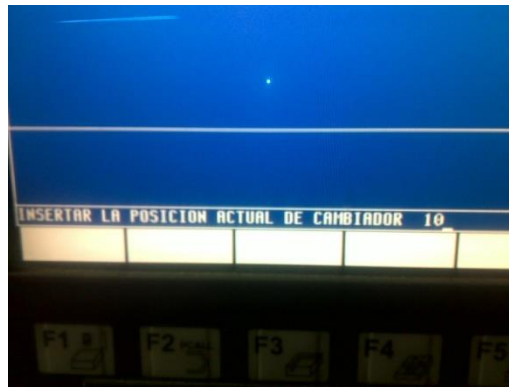


Figura 315. Insertar posición actual de cambiador

Luego se presiona ENTER (**Figura 316.**).

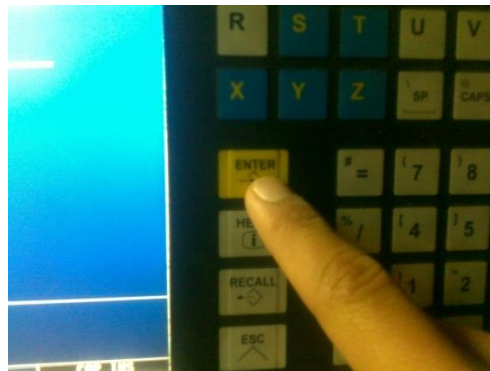


Figura 316. Insertar posición actual de cambiador

Y por último se presiona la tecla **F2 (CONFIRMAR)** para finalizar esta acción (**Figura 317.**).



Figura 317. Insertar posición actual de cambiador

Luego se presiona **MAIN MENU** para regresar a la pantalla inicial (**Figura 318.**).



Figura 318. Insertar posición actual de cambiador

### - Búsqueda de cero máquina

Lo siguiente será buscar el cero máquina. Para ello se presiona la tecla **F4** (Figura 319.).



Figura 319. Búsqueda de cero máquina.

Luego se presiona **F1 (BÚSQUEDA DE CERO)** (Figura 320.).



Figura 320. Búsqueda de cero máquina.

A continuación se presiona **F7 (TODOS)**, para seleccionar los ejes **X, Y** y **Z**, y buscar las coordenadas del cero máquina (Figura 321.).





Figura 321. Búsqueda de cero máquina.

En la **Figura 322**. Se puede observar que las letras de los ejes X, Y y Z no están sombreadas, esto significa que no han sido seleccionadas, luego de realizar el paso anterior y presionar **F7 (TODOS)**, las letras de los ejes se sombreadran como en la **Figura 323**.



Figura 322. Búsqueda de cero máquina.



Figura 323. Búsqueda de cero máquina.

Finalmente se presiona el botón de marcha (**Figura 324.**), para que el equipo ubique el cero máquina. La fresadora presentara la posición de la **Figura 325**.

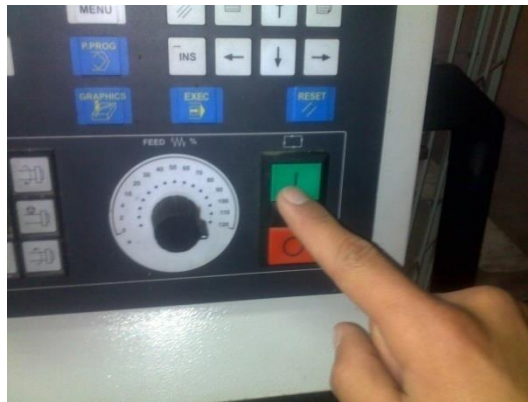


Figura 324. Búsqueda de cero máquina.



Figura 325. Búsqueda de cero máquina.

Al finalizar la Búsqueda del cero máquina se presiona **MAIN MENU** para regresar a la pantalla inicial (**Figura 326.**).



Figura 326. Búsqueda de cero máquina.

### 6.3. COLOCACIÓN DEL MATERIAL EN BRUTO

Una vez ejecutados los pasos anteriores, se colocó el material en bruto en la fresadora para que este sea mecanizado.

Así pues, se ubicó el material en bruto, en las prensas, el cual se fijó correctamente, tomando en cuenta paralelismo de las aristas con los ejes de la fresadora, y tomando referencias de ubicación, para poder realizar el mecanizado en la parte inferior. El bloque de madera utilizado tuvo las siguientes dimensiones: Largo: 1m, Ancho: 13cm y Espesor: 3cm. Cabe señalar que primero se realizó el mecanizado de la parte superior del modelo, por este motivo, las referencias tomadas deben ser lo más exactas posibles, para que al momento de efectuar el giro del modelo, la programación a aplicar se relacione con el cero pieza programado, ya que este es el mismo para el mecanizado de la parte superior e inferior.



Figura 327. Ubicando material en bruto.



Figura 328. Referencias de ubicación.





Figura 329. Referencias de ubicación.

#### 6.4. DETERMINACIÓN DEL CERO PIEZA

Una vez colocado adecuadamente el material en bruto, se debe ubicar y determinar el punto que será el cero pieza.

Para esto, en el menú principal de la pantalla inicial del tablero de control se presiona **F4 (MANUAL)** (**Figura 330.**).



Figura 330. Definir cero pieza.

Aparecerá una nueva pantalla en la que aparecen las coordenadas actuales en la que se encuentra la herramienta (**Figura 331.**).



Figura 331. Definir cero pieza.

Se coloca la herramienta (Fresa) en el punto en el cual se desea seleccionar como cero pieza. Para esto, se toma el volante, ubicado en la parte lateral izquierda del tablero de control. Se puede observar que este tiene 3 perillas, la superior que permite el control de desplazamiento en los ejes, la siguiente, permite seleccionar el eje, ya sea X, Y, Z, o el 4to o 5to eje. La última permite elegir el rango de desplazamiento en micras, desde 1 hasta 100. Por seguridad también se dispone de un pulsador de parada de emergencia (**Figura 332.**).



Figura 332. Definir cero pieza.

A continuación se elige el eje en el cual se desea realizar un desplazamiento para determinar el cero pieza. Se selecciona primero el eje X (**Figura 333.**).



Figura 333. Definir cero pieza.

La letra que designa a este eje aparecerá resaltada, y en la parte inferior de la pantalla aparecerá el texto de “**MOVIMIENTO CON VOLANTE**” (Figura 334.).



Figura 334. Definir cero pieza.

De esta manera se escoge el rango de desplazamiento y se realizan los movimientos en los tres ejes para ubicar la herramienta en el punto que se desea seleccionar como cero pieza (Figura 335.).



Figura 335. Definir cero pieza.

Una vez ubicada la herramienta en el cero pieza, se procede a la preselección del mismo, para esto se debe colocar la perilla del volante en **OFF**, de esta manera será posible efectuar dicha preselección.

Se presiona **F2 (PRESELECCIÓN)** (Figura 336.).



Figura 336. Definir cero pieza.

Aparecerán las letras de los tres ejes de coordenadas, para definir el eje X se presiona **F1** (Figura 337.).



Figura 337. Definir cero pieza.

Aparecerá el texto de “Preselección del eje X” (Figura 338.).



Figura 338. Definir cero pieza.

Se ingresa el valor de 0, para definir la coordenada actual en X como coordenada del cero pieza (Figura 339. y Figura 340.).

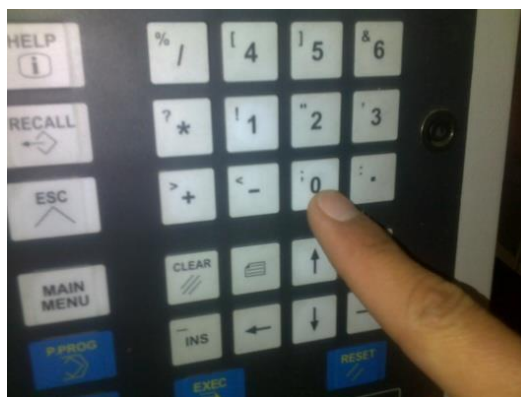


Figura 339. Definir cero pieza.

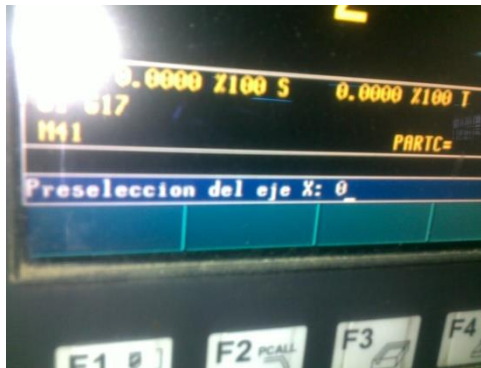


Figura 340. Definir cero pieza.

Luego se presiona **ENTER**, y el valor cambiará a 0 en el eje X (**Figura 341.** y **Figura 342.**).



Figura 341. Definir cero pieza.



Figura 342. Definir cero pieza.

El procedimiento para definir las dos coordenadas restantes es análogo.

Al final se tendrá las coordenadas del punto en el que se encuentra la herramienta como el origen de coordenadas para la pieza (**Figura 343.**).





Figura 343. Definir cero pieza.

## 6.5. TRANSFERENCIA DE FICHEROS (PC-EQUIPO CNC)

Una vez que el material se encuentra adecuadamente ubicado y se ha seleccionado el cero pieza, se procede a cargar los programas en la memoria del tablero de control CNC para la ejecución de los mismos y realizar el mecanizado.

Para ello se debe disponer de una conexión Ethernet. Así desde un ordenador, mediante el software **WinDNC** se enviará los archivos con extensión (**.PIM**) desde el ordenador hasta la memoria del equipo.

Se ejecuta el programa **WinDNC**, y se hace clic en **FICHEROS**, en el menú de herramientas de la parte lateral izquierda (**Figura 344.**).



Figura 344. Transferencia de ficheros.

Automáticamente aparecerán los programas grabados en la carpeta predeterminada del ordenador (izquierda), y los programas que se encuentran en la memoria del equipo (derecha) (**Figura 345.**).

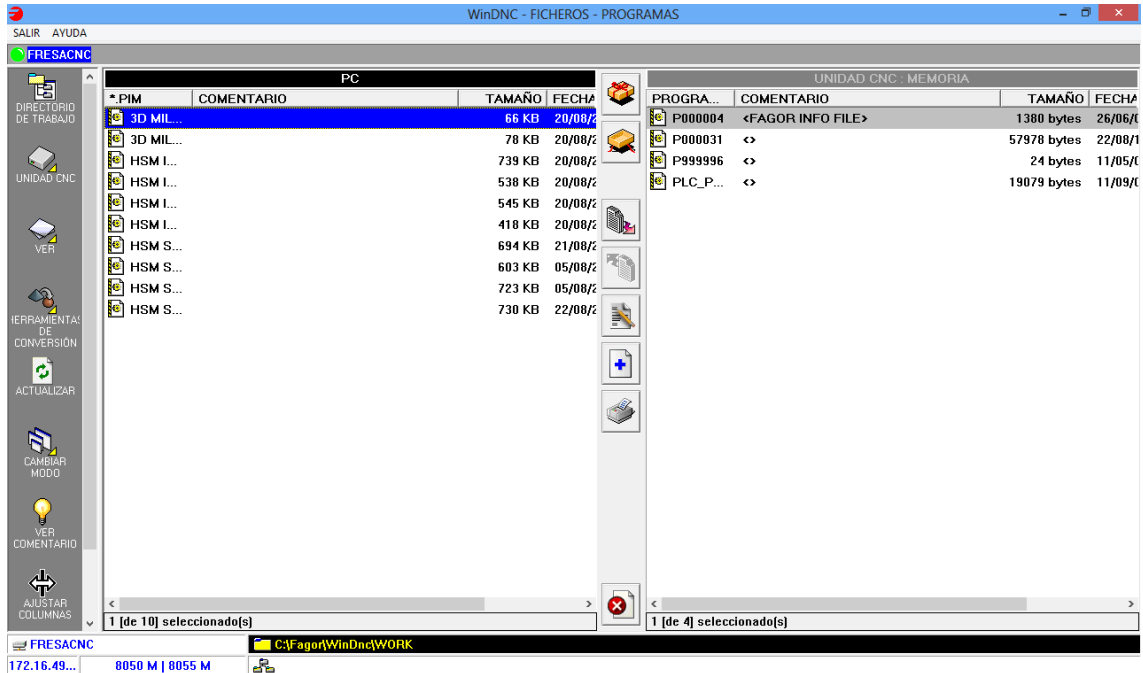


Figura 345. Transferencia de archivos.

Para transferir un programa desde la memoria del ordenador hasta la memoria de la unidad CNC, se selecciona el programa en la parte izquierda, y luego se hace clic en transferir archivos (**Figura 346.**).



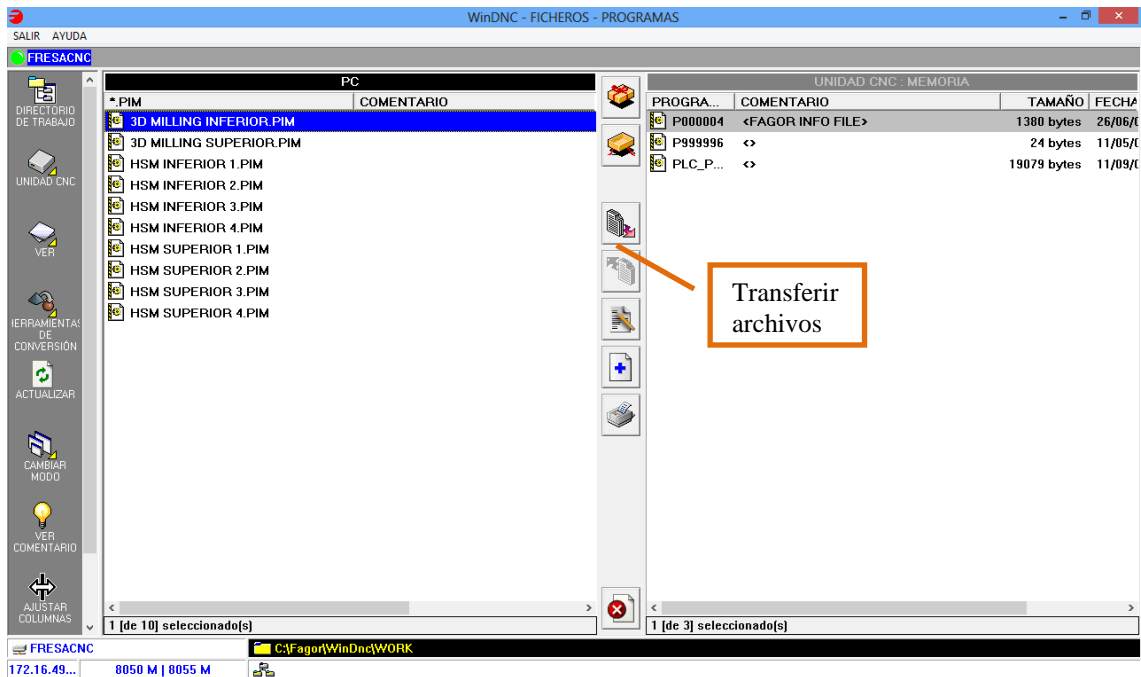


Figura 346. Transferencia de ficheros.

El nombre del fichero a enviar debe tener 6 caracteres numéricos, sino se cumple esta condición aparecerá una ventana con el mensaje de “**NOMBRE DE FICHERO NO VÁLIDO**” (Figura 347.).

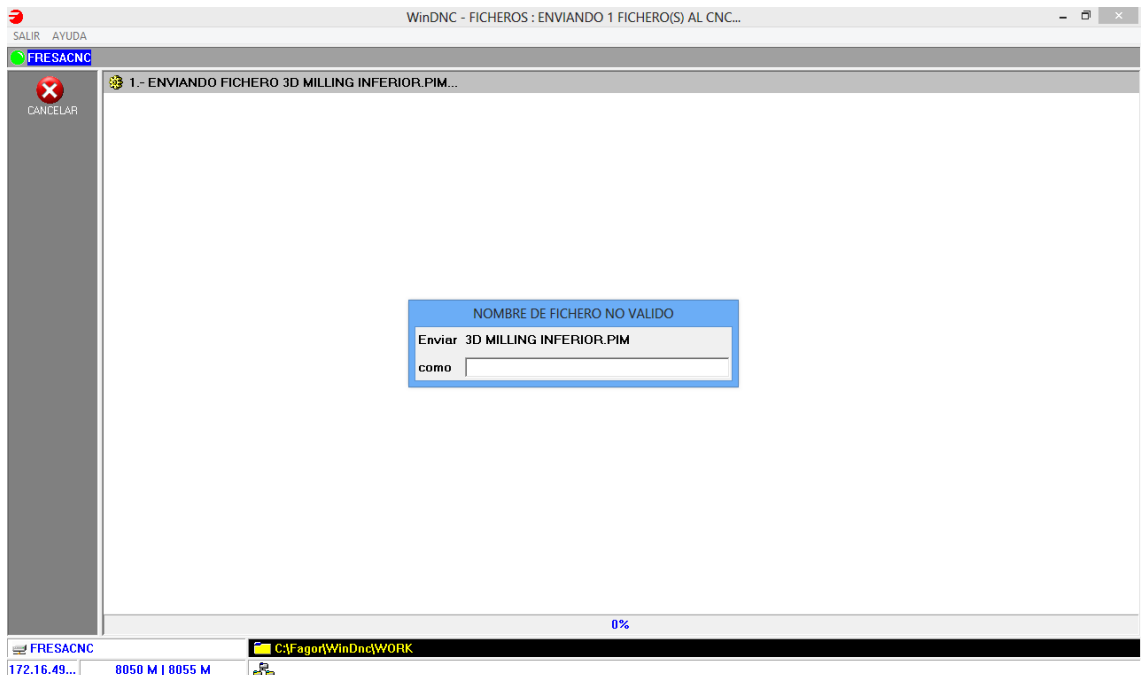


Figura 347. Transferencia de ficheros.

Se cambia el nombre del fichero, en este caso **000030**, este aparecerá resaltado con color azul lo que indica que el nombre del fichero es válido (**Figura 348.**).

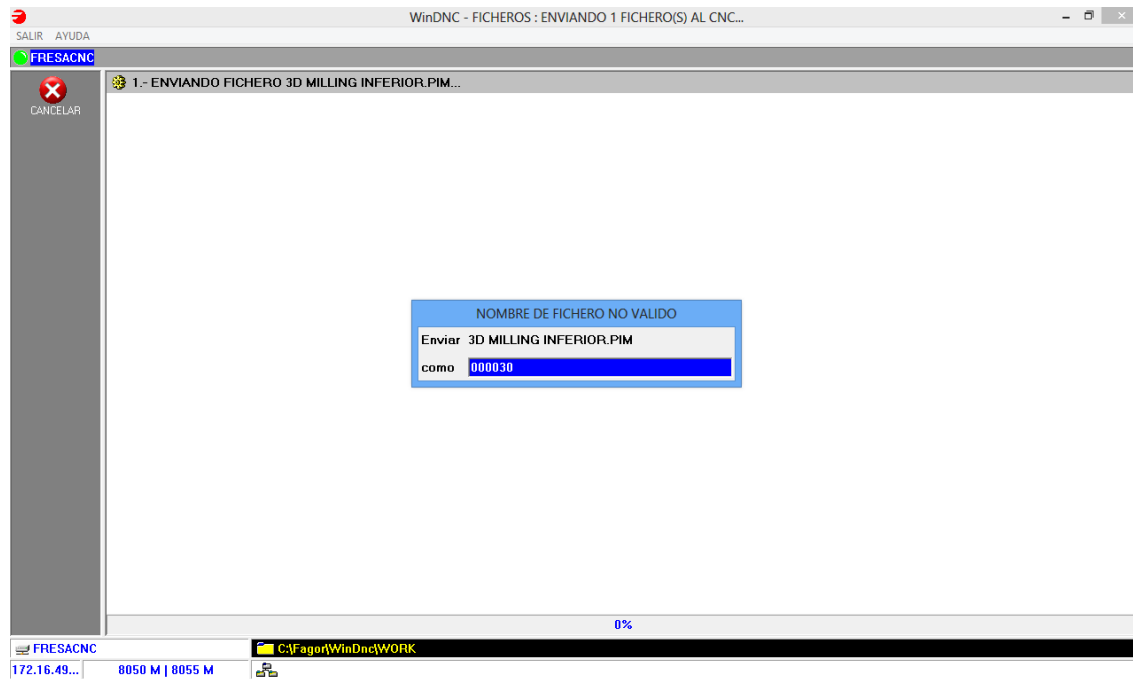


Figura 348. Transferencia de ficheros.

Se presiona **ENTER** y aparecerá un mensaje que indica que el fichero se está enviando (**Figura 349.**).

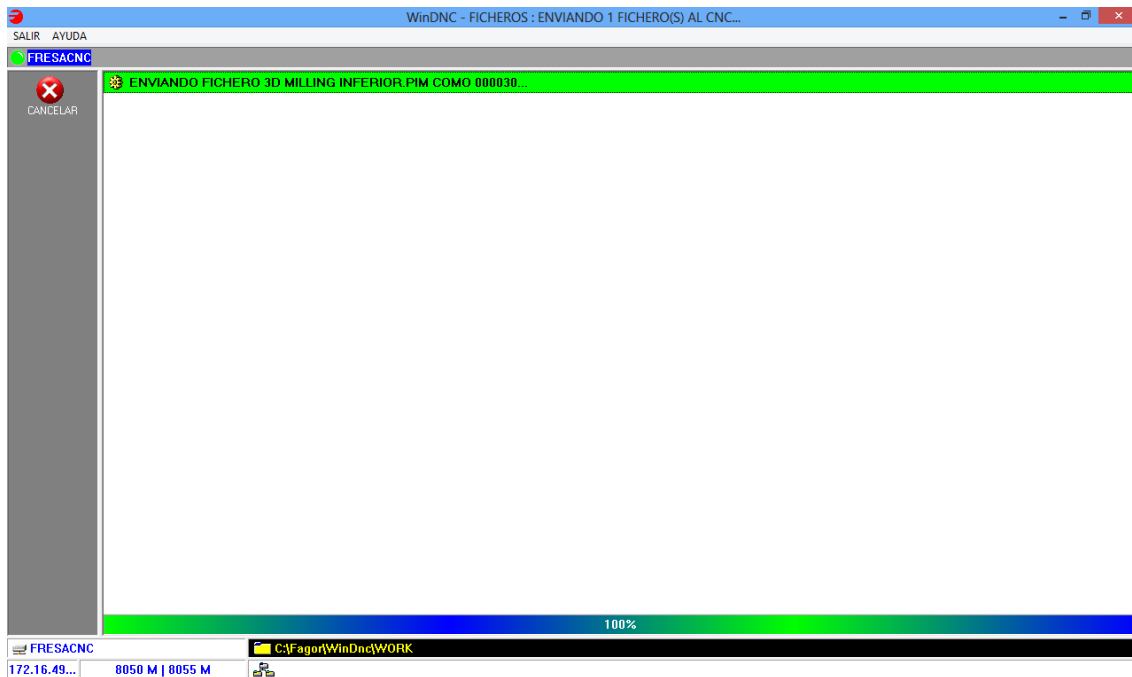


Figura 349. Transferencia de ficheros.

Inmediatamente después aparecerá el estado de **ENVIADO**, lo que indica que el fichero ha sido transferido exitosamente (**Figura 350.**).

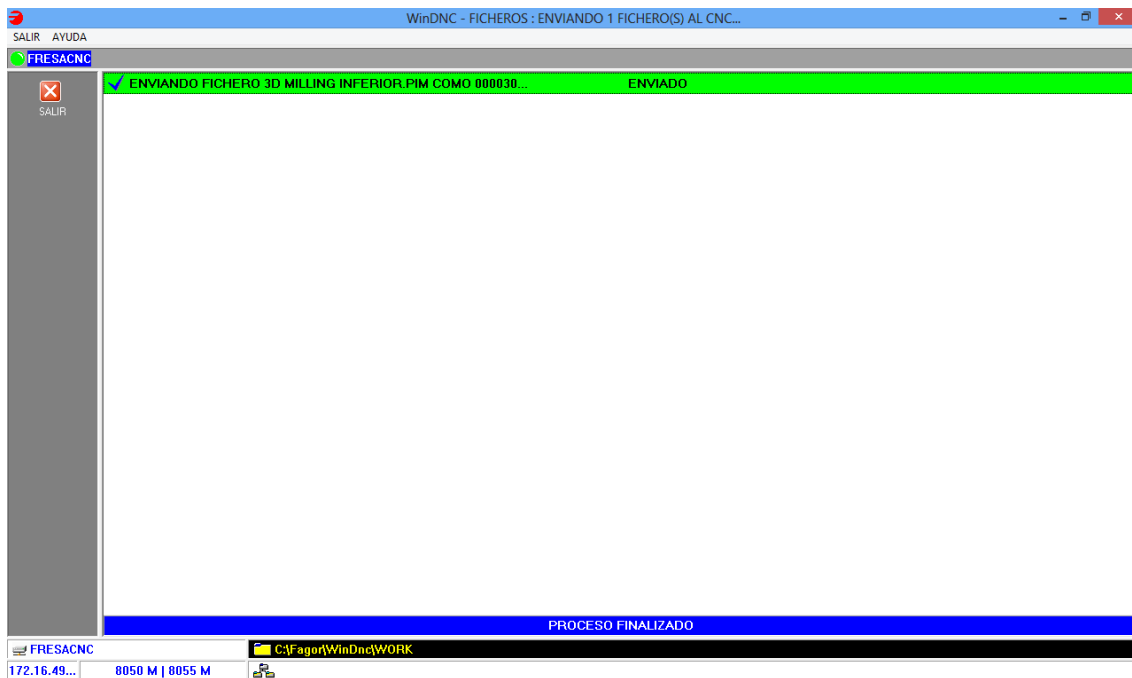


Figura 350. Transferencia de ficheros.

## 6.6. SIMULACIÓN DE PROGRAMAS

A continuación se debe simular el programa cargado para comprobar que todas las líneas de programación **CNC** son correctas.

Para ello, en la pantalla principal del tablero de control **CNC**, se presiona **F2 (SIMULAR)** (**Figura 351.**).



Figura 351. Simulación de programas

Al instante aparecerá un listado de los programas que se encuentran almacenados en la memoria del equipo (**Figura 352.**).



Figura 352. Simulación de programas

Se selecciona el programa a simular y se presiona **ENTER** (**Figura 353.**).

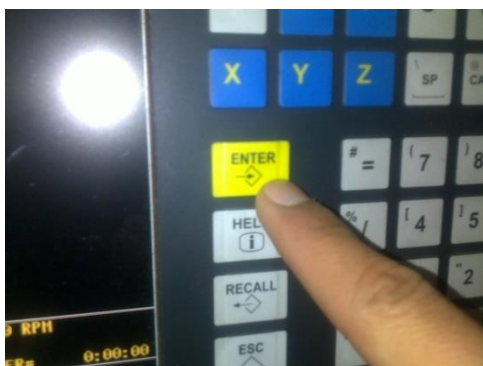


Figura 353. Simulación de programas

Luego de esto se presiona **F1 (RECORRIDO TEÓRICO)** (Figura 354.).



Figura 354. Simulación de programas

Lo siguiente es presionar **F6 (GRÁFICOS)** (Figura 355.).



Figura 355. Simulación de programas

Aparecerá la pantalla vacía. (Figura 356.)

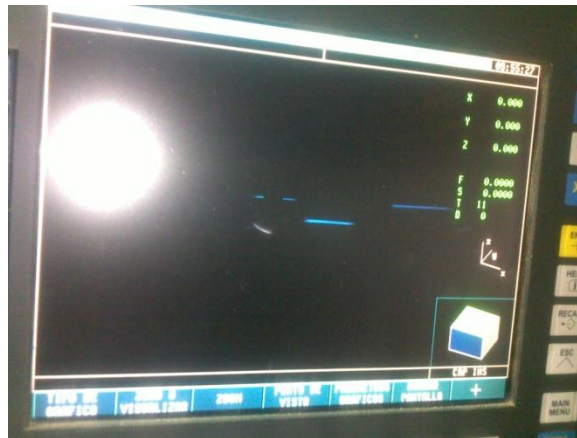


Figura 356. Simulación de programas

Para ejecutar la programación y observar el recorrido teórico de la herramienta, se presiona el botón verde de marcha (**Figura 357.**).

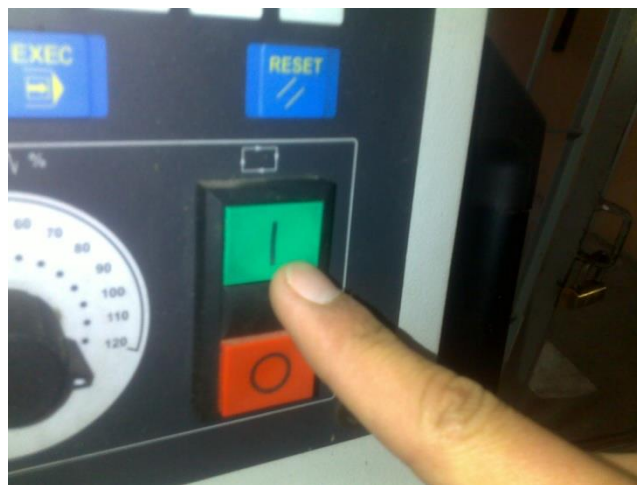


Figura 357. Simulación de programas

Se realizará la ejecución del programa, y se podrá apreciar el recorrido de la herramienta en las líneas de color azul (**Figura 358.**).

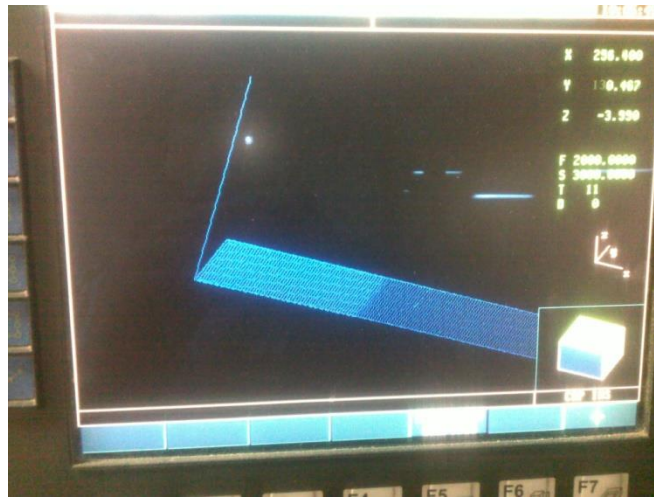


Figura 358. Simulación de programas

## 6.7. EJECUCIÓN DE PROGRAMAS

Para ejecutar un programa y así realizar el mecanizado sobre el material en bruto, en la pantalla principal del Tablero de control CNC, se presiona **F1 (EJECUTAR)** (**Figura 359.**).



Figura 359. Ejecución de programas

Aparecerá un listado de los programas que se encuentran almacenados en la memoria del equipo (**Figura 360.**).



Figura 360. Ejecución de programas

Se selecciona el programa a ejecutar y se presiona **ENTER** (Figura 361.).



Figura 361. Ejecución de programas

Aparecerá una pantalla en la que se indica la programación a ejecutar (Figura 362.).



Figura 362. Ejecución de programas

Para ejecutar la programación y realizar el mecanizado, presionamos el botón verde de marcha (Figura 363.).



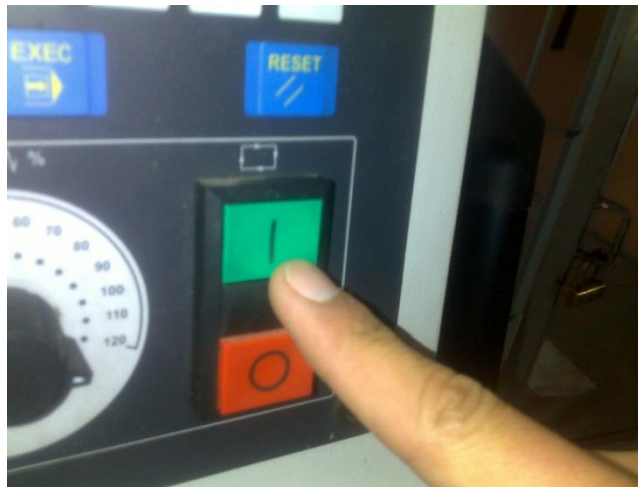


Figura 363. Ejecución de programas

Se realizará la ejecución del programa, y se podrá apreciar como el husillo y la bancada efectúan los movimientos de acuerdo a la programación, para plasmar el modelo en el material (**Figura 364.**).



Figura 364. Ejecución de programas

## 6.8. ELIMINACIÓN DE UN PROGRAMA

La memoria con la que cuenta el equipo CNC no es la suficiente como para almacenar un programa completo de la operación de acabado (1MB de memoria), por lo que se debe realizar la división del mismo y transferir este fichero por partes, para esto, se debe borrar el programa que ya se ha ejecutado y reemplazarlo por el siguiente.

Para esto, primero se debe regresar al menú principal del tablero CNC, ya que si tratamos de borrar el programa sin realizar éste paso, se crearán conflictos y no se podrá ejecutar esta orden.

Así, lo que se hace es presionar **MAIN MENU** (**Figura 365.**).



Figura 365. Eliminación de un programa

Y seguidamente se presiona primero **SHIFT** y luego **ESCAPE**, dos veces, siguiendo esta combinación (**Figura 366.** y **Figura 367.**).

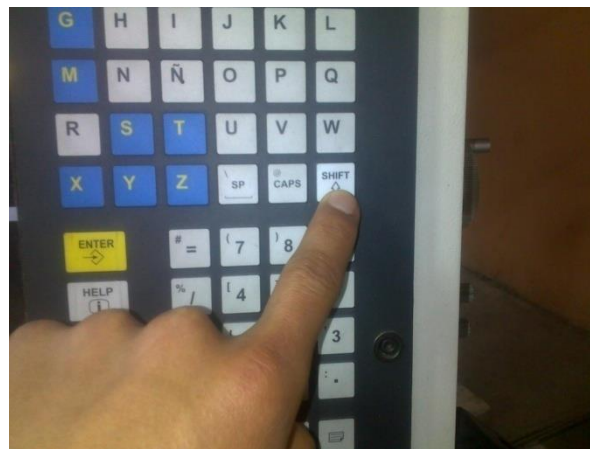


Figura 366. Eliminación de un programa



Figura 367. Eliminación de un programa

Se mostrara la pantalla inicial del tablero de control CNC (**Figura 368.**).



Figura 368. Eliminación de un programa

En este punto ya se podrá eliminar el programa en cuestión desde el ordenador. Para esto, utilizando el programa **WinDNC**, se selecciona el archivo que se desea eliminar en la **MEMORIA** de la **UNIDAD CNC**, y se presiona **SUPRIMIR** (Figura 369.).

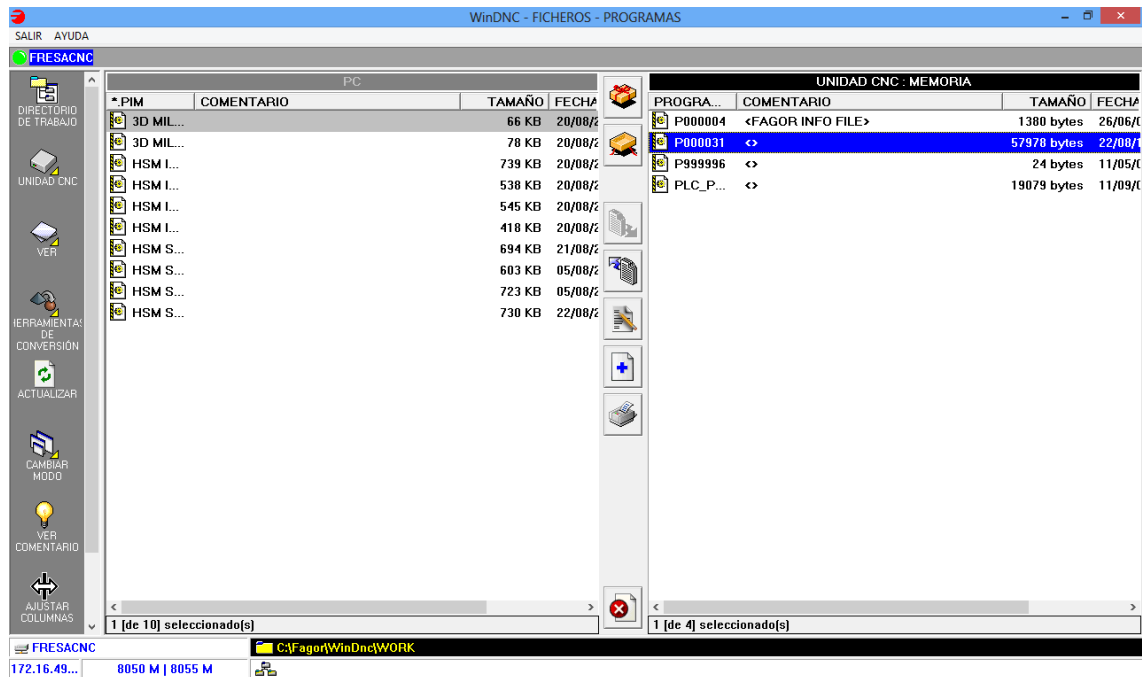


Figura 369. Eliminación de un programa

Aparecerá un mensaje de confirmación, se hace clic en **SI** (Figura 370.).

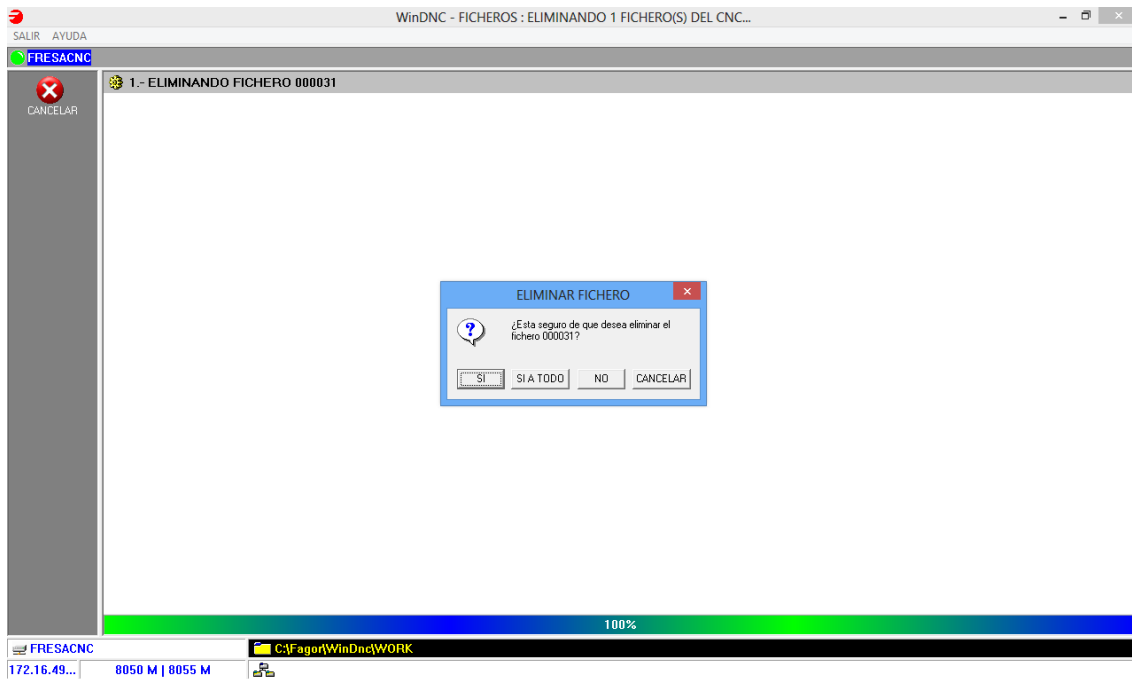


Figura 370. Eliminación de un programa

Al finalizar, se mostrara un mensaje de **PROCESO FINALIZADO** (Figura 371.).

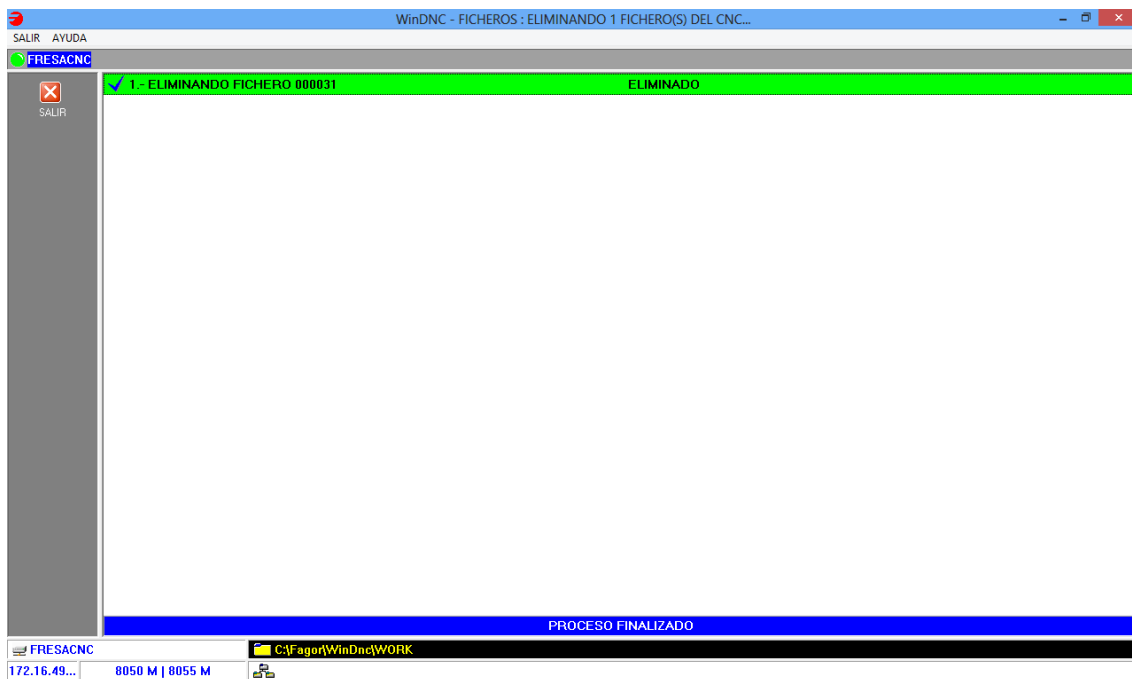


Figura 371. Eliminación de un programa

Concluida la eliminación del programa no utilizado, se vuelve a realizar la transferencia de ficheros, simulación del nuevo programa, y por último la ejecución del mismo.

Finalizada la ejecución de programas de la parte superior, se procede a girar el material, tratando de que todas las referencias coincidan con la nueva posición (**Figura 372.**, **Figura 373.** y **Figura 374.**). Lo siguiente es ubicar el cero pieza, verificando que este coincida con el tomado anteriormente en el mecanizado superior, se procederá con la simulación y ejecución de programas (**Figura 375.**).



Figura 372. Giro del material en bruto y ejecución del mecanizado de la parte inferior del modelo



Figura 373. Giro del material en bruto y ejecución del mecanizado de la parte inferior del modelo



Figura 374. Giro del material en bruto y ejecución del mecanizado de la parte inferior del modelo



Figura 375. Giro del material en bruto y ejecución del mecanizado de la parte inferior del modelo

Al momento de ejecutar la programación, existieron conflictos generados por la longitud del modelo, ya que la herramienta necesitaba desplazarse fuera del área de trabajo, por un espacio mayor a los 800mm que la bancada permite moverse en el eje X, por este motivo se acorto la longitud del modelo en 25mm. Luego de esta modificación se obtuvo un modelo de pala con características similares a las del diseño inicial (**Figura 376.**).



Figura 376. Modelo final en madera.

## **g. DISCUSIÓN**

Los perfiles alares NACA son perfiles que en un principio fueron aplicados para el diseño y construcción de alas de aeronaves, pero con el avance de la tecnología y mediante pruebas realizadas se ha determinado que estos perfiles pueden aplicarse en palas de turbinas eólicas.

Las curvas del perfil en función de la cuerda raíz y la cuerda punta de pala, tanto del intradós como del extradós, se determinaron con funciones existentes correspondientes a la determinación de coordenadas de curvas de perfiles NACA de las series con 4 dígitos, que se pueden obtener y aplicar de manera sencilla. En ésta parte inicial de diseño se efectuaron cálculos básicos, y bastó con ingresar las funciones mencionadas en una hoja de cálculo (Microsoft Office Excel) para obtener los 60 pares de coordenadas de las curvas del perfil NACA 4415. En esta parte hay que tener en cuenta que, entre más numeroso sea el conjunto de puntos de cada curva, la suavidad de la misma aumentará, esto tiene como propósito obtener unas superficies lo más lisas posibles en la parte del mecanizado, de esta manera, la rugosidad de las superficies en contacto con el viento disminuye y así la resistencia del modelo a la fuerza del flujo, ya que en el diseño de turbinas eólicas, se procura que el fluido pase a través de las palas sin generar turbulencias a la salida, de esta manera las presiones generadas (en las superficies del extradós e intradós de la pala) por el paso del viento serán las adecuadas. Con las gráficas de las curvas del perfil obtenidas, se comprobó que para las dimensiones de las cuerdas, tanto en la raíz como en la punta de la pala, los 60 pares de coordenadas fueron suficientes para proveer de la suavidad mencionada a las superficies.

Una vez obtenido el conjunto de coordenadas de las curvas del perfil, se realizó el diseño del modelo de pala, insertando dichas coordenadas en un software CAD (SolidWorks), el cual mediante operaciones propias de su sistema permitió realizar un modelado geométrico utilizando las medidas previamente calculadas, para crear un objeto sólido. Esta parte no presentó mayores inconvenientes, puesto que solamente se requiere tener los conocimientos de manejo del software. Este modelo propuesto responde a los requerimientos de este proyecto, es decir es un modelo convencional, puesto que el trabajo realizado está

relacionado con las palas de turbinas eólicas como elementos componentes de una turbina eólica, ya que no se planteó como objetivo la construcción del rotor.

En el punto en que se obtuvo el modelo final, usando un software CFD (Flow Simulation de SolidWorks) se evaluó el comportamiento del modelo en interacción con el flujo de aire a una velocidad de 12 m/s en condiciones normales (20°C, Presión atmosférica), identificando si en algún punto del modelo se generaban turbulencias u otro factor que pudiese afectar a la función del modelo. Así también se generó una base de datos correspondientes a las presiones originadas en el modelo por efectos de flujo, esto para la evaluación del modelo mediante un análisis estático y a fatiga.

Comprobado que el modelo mostró un comportamiento aceptable en la interacción con el fluido, se lo sometió a un análisis estático y a fatiga, utilizando un complemento del software CAD (Simulation de SolidWorks).

Para realizar los análisis mencionados, se eligió un material adecuado para la evaluación virtual del modelo, en este caso se aplicó madera de Balsa, la cual es muy utilizada en este tipo de aplicaciones.

En el análisis estático se sometió al modelo a soportar las cargas originadas por la gravedad y por los efectos de flujo con la base de datos obtenida en el análisis CFD. Los resultados de este análisis mostraron, en cuanto a rigidez del modelo, que el máximo esfuerzo experimentado por el mismo es de 0.3 MPa, que comparado con el límite elástico de este material (20 MPa) se encuentra en un rango admisible. Además el desplazamiento máximo debido a la deformación del modelo, es de 1.25 mm, es decir casi despreciable.

El análisis de fatiga se lo realizó en base a los resultados obtenidos en el análisis estático, es decir el modelo de pala fue sometido a experimentar 1000 ciclos de repetición de las cargas experimentadas en el análisis estático. Los resultados de este análisis mostraron que, en cuanto a porcentaje de daño el modelo se mantendrá 100% libre de roturas. Y respecto a la vida total del modelo, éste soportará el número de ciclos aplicado.



En base a los resultados del análisis estático y de fatiga se comprobó que el modelo de pala (construido con uno de los materiales más utilizados en la construcción de turbinas eólica, aluminio) podrá cumplir con los requerimientos de rigidez y tenacidad que las condiciones previstas ameritan.

Luego de que el modelo de pala fue evaluado, se continuó con la parte correspondiente a la simulación del mecanizado para la construcción, utilizando software CAM (SolidCAM). Ya que el software CAM es desarrollado por la misma compañía creadora del software CAD, exportación CAD-CAM del modelo no presentó contrariedades. Dado que la fresadora del taller mecánico de la Universidad Nacional de Loja solo tiene tres ejes de desplazamiento operativos, se necesitó obligadamente dividir el mecanizado en dos partes, la primera correspondiente a la parte superior del modelo y la segunda a la parte inferior. Así se determinaron las operaciones de desbaste y acabado, con sus respectivos parámetros (velocidad de avance de herramienta, revoluciones por minuto, número de pasadas, etc.), se simuló dichas operaciones, observando las trayectorias de la herramienta, para tomar consideraciones en la parte de construcción. Finalmente se generaron los programas CNC necesarios para el realizar el mecanizado con la fresadora.

En la fase de construcción del modelo, en vista de que el objetivo principal de este trabajo de investigación, era elaborar una metodología de diseño y construcción de palas para turbinas eólicas, se halló conveniente construir el modelo de pala utilizando como material madera de ciprés.

La parte de la construcción comprendió, primeramente el conocimiento de manejo del equipo (Fresadora Travis M5 con Control CNC FAGOR 8055M), lo cual no presentó mayor dificultad. En cuanto a la construcción en sí del modelo, lo primero fue realizar pruebas de mecanizado correspondientes a la parte superior e inferior del mismo, estas para analizar si las velocidades de avance y operaciones eran las adecuadas, y para observar si existía algún problema al momento de girar el material para realizar el mecanizado de la parte restante. Así en las primeras pruebas se identificó que se necesitaba espacio extra de

desplazamiento en el eje X, esto debido a movimientos de la herramienta fuera del área de trabajo, por lo que se modificó la longitud del modelo, acortándolo 25mm, además se identificó un desfase en el plano correspondiente a las cuerdas del modelo, debido a errores en la calibración y ubicación de puntos de referencia. Una vez identificados los factores que incidían en el desplazamiento o desfase, y tomando las medidas necesarias para eliminar este inconveniente, se logró mecanizar el material obteniendo un modelo con características similares a las del diseño original.

## **h. CONCLUSIONES**

Al concluir el presente trabajo de investigación se han citado las siguientes conclusiones:

- Se logró recopilar y revisar la información referente a la aplicación de Perfiles Alares, para realizar un diseño de pala para turbinas eólicas.
- Se consiguió diseñar un modelo de pala para turbinas eólicas basado en el perfil alar NACA 4415, utilizando un software para el Diseño Asistido por Computadora (CAD).
- Se realizó un análisis del modelo de pala con software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), constatando que no se producían turbulencias cuando el flujo de aire atravesaba el modelo.
- Se identificaron las operaciones apropiadas, así como los pasos necesarios para el mecanizado del modelo, los mismos que constituyen el algoritmo metodológico de construcción, se simularon las operaciones de mecanizado, y finalmente se obtuvo la programación de Control Numérico Computarizado (CNC) para ejecutarla en la Máquina Fresadora.
- Se construyó el modelo de pala de turbina eólica en base al perfil NACA 4415 con una Máquina Fresadora con Control Numérico Computarizado con características similares a las del modelo original.
- El número de pares de coordenadas establecido inicialmente para la obtención de las curvas del perfil alar NACA 4415, tanto en la raíz como en la punta de pala, permitió proveer de la suavidad deseada a las curvas del perfil, de esta manera el modelo de pala simulado en el software de Dinámica de Fluidos Computacional no origina turbulencias en el flujo de aire que lo atravesaba. Así mismo la operación de acabado en el mecanizado del modelo, reveló una superficie muy lisa.
- El diseño propuesto de una pala para turbinas eólicas, construido con el material apropiado para ésta aplicación, cumplirá con los requerimientos de rigidez y tenacidad, a los que se someterá como elemento de un rotor de turbina eólica, y por esto puede ser utilizado para este propósito.

## **i. RECOMENDACIONES**

- Respecto al análisis con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es aconsejable no definir un dominio computacional demasiado grande, ya que esto consumirá mucha memoria RAM y a su vez el periodo de tiempo será demasiado largo.
- Así mismo, cuando se definan las Flow Trajectories (Trayectorias de flujo), es aconsejable no insertar un número muy alto de puntos, puesto que esto demanda mucho tiempo para realizar el análisis.
- Cuando se realice el análisis estático, al definir la malla, ésta no debe ser muy fina, puesto que esto demandará mucha memoria y el análisis será muy prolongado.
- Realizando la simulación del mecanizado en el software de Fabricación Asistida por Computadora (CAM), se deben observar detenidamente las trayectorias de la herramienta, esto para tomar las consideraciones en cuanto a dimensiones del material en bruto, operaciones de mecanizado, áreas de trabajo para mecanizar, herramienta.
- Antes de realizar el mecanizado para el modelo final, realizar pruebas de mecanizado en un material de similares características, de esta manera se identificarán si las operaciones utilizadas y sus parámetros son los apropiados, así también se identificarán factores en cuanto a la ubicación del material que podrían dar problemas al momento de determinar los puntos de referencia.
- Si se realizan mecanizados en madera, utilizar un tipo de madera utilizado para el tallado, es decir que no sea de tipo fibrosa, ya que esto influye mucho en el mecanizado del modelo.
- Las operaciones obtenidas en la programación CNC, pueden provocar que la herramienta se desplace fuera del área de trabajo definida en la parte de simulación del mecanizado con software para la Fabricación Asistida por Computadora (CAM), y al cargar la programación de Control Numérico Computarizado (CNC) obtenida en el equipo de mecanizado (Fresadora), se generarán conflictos relacionados con el máximo desplazamiento de la máquina CNC, por esta razón se debe reducir el área

de trabajo definida en el software de Dinámica de Fluidos Computacional (CAM), dependiendo de las dimensiones de la herramienta.

- En el caso de cambiar de posición el material para realizar mecanizados, utilizar herramientas de sujeción (entenalla) en muy buen estado, para que las referencias de ubicación tomadas no se alteren al momento de mover el modelo.
- Ya que se cuenta con la metodología de diseño y construcción de palas para turbinas eólicas de eje horizontal, el presente trabajo podría ampliarse construyendo un rotor.

## j. BIBLIOGRAFÍA

### - LIBROS:

1. Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E., **“Theory of Wing Sections (summary of Airfoil Data)** Dover, New York, 1959.
2. Anderson, J. D., **“Fundamentals of Aerodynamics”**, Third Edition, Ed. Mc Graw Hill, 2001.
3. Arias Vega, Fernando, **“Fundamentos en Aerodinámica para Aeroturbinas de Eje Horizontal.** Ed. Ciemat, 2006
4. Bastianón, R.A., **“Teoría de la Hélice para Turbinas Eólicas”**, Servicio Naval de Investigación y Desarrollo, Armada Argentina, Junio 1980.
5. Bastianón, Ricardo A., **“Energía del viento y diseño de turbinas eólicas”**, Ed. Tiempo de Cultura Ediciones, 1994
6. Bradford, E. Green et al. **“A Method for the constrained design of natural laminar flow airfoils 14<sup>th</sup> AIAA Applied Aerodynamics Conference”**, June 17-20, 1996, New Orleans, LA
7. Cádiz Deleito, J. C., **“La Energía Eólica: Tecnología e Historia”**. Ed. Hermann Blume. España. 1984.
8. Csanady G. T. **“Theory of Turbomachines”**. Mc Graw Hill. 1964
9. Dahl S. Kristian, Fuglsang Peter. **“Design of the Wind Turbine Airfoil Family RISO-A-XX”**, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, December 1998
10. Escudero López, J. M., **“Manual de Energía Eólica”** Mundiprensa 1998
11. Fernández Díez, Pedro, **“Energía Eólica Colección”** Colección Universidad de Cantabria 2001
12. Filippone, Antonio, The University of Manchester, **Dept. Mechanical, Aerospace, Civil Engineering**
13. Gipe, Paúl, **“Energía Eólica práctica”** Sevilla, España Progensa 2000
14. Jacobs Eastman, N., Ward Kenneth E., Pinkerton Robert M. **“The Characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel”**, NACA Report 460. 1932

15. Jepson Jeffrey, Keith, **“Enhancements to the Inverse Design of Low Speed Natural Laminar Flow Airfoils”**, North Carolina State University. Aerospace Engineering. MSc Thesis. 2003
16. Le Gourières, D., **“Energía Eólica”** Ed. Masson S.A. Barcelona (1998)
17. Lecuona Neumann, Antonio, **“Energía eólica. Principios básicos y tecnología”**. Universidad Carlos III de Madrid. (2005).
18. Liebeck, R. H. **“Design of Subsonic Airfoils for High Lift”**, Aircraft J., Vol. 15, No. 9, 1978 547-
19. Selig M. S. and Guglielmo J. J. **“High-Lift Low Reynolds Number Airfoil Design”**, Aircraft J. Vol. 34, No. 1, January-February 1997.
20. Somers Dan, M., **President of Airfoils Incorporated, Research Engineer, NASA Langley Research Center**
21. Volpe G., Melnik R. E., **“The Role of constraints in the inverse design problem for transonic airfoils”**, AIAA Journal, 22, 1984, 12, 1770-1778
22. Wayman, T. R. **“Low Reynolds Number Airfoil Design using the Eppler Method”**, AIAA Journal 1993
23. Zingg, D. W., Jay Liu P. Y., Kong F. M., **Comparison of optimization and inverse design of long-endurance airfoils.**

**- TESIS:**

1. Cabrera, Oscar; Cuenca, Darwin. 2008: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR EXPERIMENTAL Y MODULAR PARA APLICACIÓN RURAL
2. Funes Ruiz, José Félix. 2009: ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA PALA DE AEROGENERADOR - UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

- **SITIOS WEB:**

1. [http://aero.us.es/adesign/Slides/Pautas/Tema\\_Extra\\_Introduccion\\_Perfiles\\_NACA.pdf](http://aero.us.es/adesign/Slides/Pautas/Tema_Extra_Introduccion_Perfiles_NACA.pdf)
2. <http://www.alu-stock.es/catalogo/pdf/libro/Alu-Stock-LA4-11-Aleaciones.pdf>
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/NACA\\_airfoil](http://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil)
4. <http://es.pfernandezdiez.es/index.php?pageID=16>
5. <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4a4671e07c6a1.pdf>
6. [http://www.infoweb2.unp.edu.ar/posgrado/Documentos/materias2011/Innovaciones%20tecnologicas%20en%20maquinas%20eolicas/CALCULO\\_SIMPLE\\_DE\\_LA\\_HELICE.pdf](http://www.infoweb2.unp.edu.ar/posgrado/Documentos/materias2011/Innovaciones%20tecnologicas%20en%20maquinas%20eolicas/CALCULO_SIMPLE_DE_LA_HELICE.pdf)
7. [http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/buenos\\_aires/62/princip.htm](http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/buenos_aires/62/princip.htm)
8. <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/INDEX.htm>



## k. ANEXOS

### 1. HOJAS DE CÁLCULO PARA OBTENER EL PERFIL ALAR NACA 4415

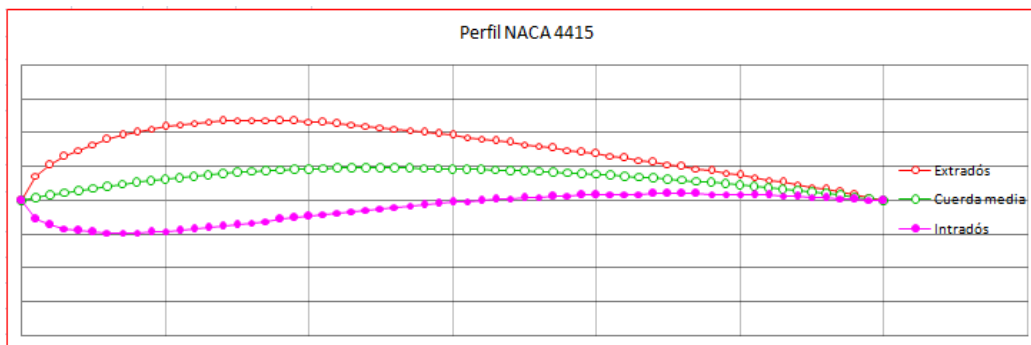
#### 1.1. PERFIL ALAR EN FUNCIÓN DE LA CUERDA RAÍZ DE PALA

PERFIL NACA: Serie de 4 dígitos	
P	
4	0,04 m; Máxima curvatura.
4	0,4 p; Posición de la Máxima curvatura.
15	0,15 t; Espesor.
60	Número de datos

c
12 cm

	x	y(c)	y(t)	dy <sub>c</sub> /dx	θ	x(U)	x(L)	y(U)	y(L)
1	0,000	0,000	0,000	0,200	0,197	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,200	0,039	0,325	0,100	0,100	0,168	0,232	0,363	-0,284
3	0,400	0,077	0,447	0,000	0,000	0,400	0,400	0,523	-0,370
4	0,600	0,113	0,533	-0,044	-0,044	0,624	0,576	0,645	-0,420
5	0,800	0,147	0,601	-0,089	-0,089	0,853	0,747	0,745	-0,452
6	1,000	0,179	0,656	-0,133	-0,133	1,087	0,913	0,830	-0,471
7	1,200	0,210	0,702	-0,178	-0,176	1,323	1,077	0,902	-0,482
8	1,400	0,239	0,741	-0,222	-0,219	1,561	1,239	0,963	-0,484
9	1,600	0,267	0,774	-0,267	-0,261	1,799	1,401	1,015	-0,481
10	1,800	0,293	0,802	-0,311	-0,302	2,038	1,562	1,058	-0,473
11	2,000	0,317	0,825	-0,356	-0,342	2,276	1,724	1,094	-0,461
12	2,200	0,339	0,845	-0,400	-0,381	2,514	1,886	1,123	-0,445
13	2,400	0,360	0,861	-0,444	-0,418	2,750	2,050	1,146	-0,426
14	2,600	0,379	0,874	-0,489	-0,455	2,984	2,216	1,164	-0,406
15	2,800	0,397	0,884	-0,533	-0,490	3,216	2,384	1,176	-0,383
16	3,000	0,413	0,891	-0,578	-0,524	3,446	2,554	1,184	-0,359
17	3,200	0,427	0,896	-0,622	-0,557	3,674	2,726	1,188	-0,334
18	3,400	0,439	0,899	-0,667	-0,588	3,899	2,901	1,187	-0,309
19	3,600	0,450	0,900	-0,711	-0,618	4,122	3,078	1,184	-0,284
20	3,800	0,459	0,899	-0,756	-0,647	4,342	3,258	1,177	-0,258
21	4,000	0,467	0,897	-0,800	-0,675	4,560	3,440	1,167	-0,233
22	4,200	0,473	0,892	-0,844	-0,701	4,776	3,624	1,154	-0,209
23	4,400	0,477	0,886	-0,889	-0,727	4,989	3,811	1,139	-0,186
24	4,600	0,479	0,879	-0,933	-0,751	5,200	4,000	1,122	-0,164
25	4,800	0,480	0,870	-0,978	-0,774	5,409	4,191	1,102	-0,142
26	5,000	0,480	0,861	-1,022	-0,796	5,615	4,385	1,081	-0,122
27	5,200	0,479	0,849	-1,067	-0,818	5,820	4,580	1,059	-0,102

28	5,400	0,477	0,837	-1,111	-0,838	6,022	4,778	1,037	-0,083
29	5,600	0,474	0,824	-1,156	-0,857	6,223	4,977	1,013	-0,065
30	5,800	0,471	0,809	-1,200	-0,876	6,422	5,178	0,989	-0,047
31	6,000	0,467	0,794	-1,244	-0,894	6,619	5,381	0,964	-0,031
32	6,200	0,462	0,778	-1,289	-0,911	6,815	5,585	0,939	-0,015
33	6,400	0,456	0,761	-1,333	-0,927	7,009	5,791	0,913	0,000
34	6,600	0,450	0,743	-1,378	-0,943	7,201	5,999	0,886	0,014
35	6,800	0,443	0,724	-1,422	-0,958	7,392	6,208	0,859	0,026
36	7,000	0,435	0,705	-1,467	-0,972	7,582	6,418	0,832	0,038
37	7,200	0,427	0,685	-1,511	-0,986	7,771	6,629	0,804	0,049
38	7,400	0,417	0,664	-1,556	-0,999	7,958	6,842	0,776	0,059
39	7,600	0,407	0,642	-1,600	-1,012	8,144	7,056	0,748	0,067
40	7,800	0,397	0,620	-1,644	-1,024	8,330	7,270	0,719	0,075
41	8,000	0,385	0,597	-1,689	-1,036	8,514	7,486	0,689	0,081
42	8,200	0,373	0,574	-1,733	-1,048	8,697	7,703	0,660	0,086
43	8,400	0,360	0,550	-1,778	-1,058	8,879	7,921	0,629	0,091
44	8,600	0,346	0,525	-1,822	-1,069	9,060	8,140	0,599	0,094
45	8,800	0,332	0,500	-1,867	-1,079	9,241	8,359	0,568	0,096
46	9,000	0,317	0,474	-1,911	-1,089	9,420	8,580	0,536	0,097
47	9,200	0,301	0,448	-1,956	-1,098	9,599	8,801	0,505	0,097
48	9,400	0,284	0,421	-2,000	-1,107	9,776	9,024	0,472	0,096
49	9,600	0,267	0,393	-2,044	-1,116	9,953	9,247	0,440	0,094
50	9,800	0,249	0,365	-2,089	-1,124	10,130	9,470	0,406	0,091
51	10,000	0,230	0,337	-2,133	-1,132	10,305	9,695	0,373	0,087
52	10,200	0,210	0,308	-2,178	-1,140	10,480	9,920	0,338	0,082
53	10,400	0,190	0,278	-2,222	-1,148	10,654	10,146	0,304	0,075
54	10,600	0,169	0,248	-2,267	-1,155	10,827	10,373	0,269	0,068
55	10,800	0,147	0,217	-2,311	-1,162	10,999	10,601	0,233	0,060
56	11,000	0,124	0,186	-2,356	-1,169	11,171	10,829	0,197	0,051
57	11,200	0,101	0,154	-2,400	-1,176	11,342	11,058	0,160	0,042
58	11,400	0,077	0,121	-2,444	-1,182	11,512	11,288	0,122	0,031
59	11,600	0,052	0,088	-2,489	-1,189	11,681	11,519	0,085	0,019
60	11,800	0,026	0,054	-2,533	-1,195	11,850	11,750	0,046	0,007
61	12,000	0,000	0,019	-2,578	-1,201	12,018	11,982	0,007	-0,007



## 1.2. PERFIL ALAR EN FUNCIÓN DE LA CUERDA PUNTA DE PALA

PERFIL NACA: Serie de 4 dígitos

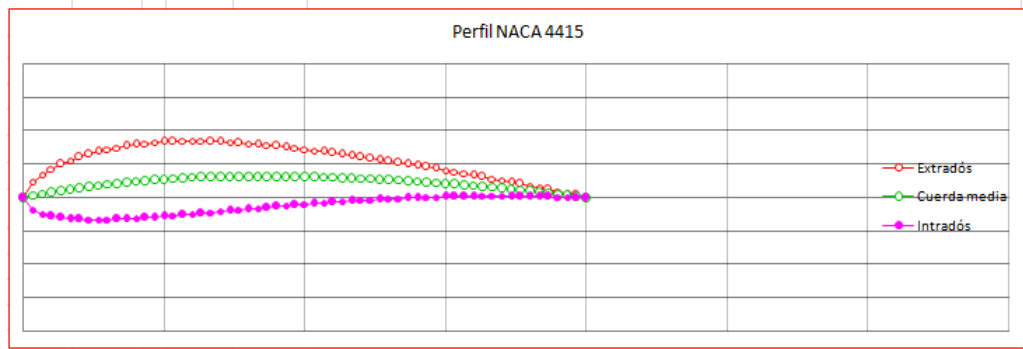
c

8 cm

P		
4	0,04	m; Máxima curvatura.
4	0,4	p; Posición de la Máxima curvatura.
15	0,15	t; Espesor.
	60	Número de datos

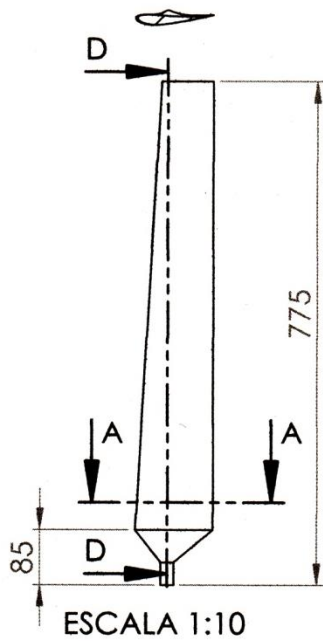
	x	y(c)	y(t)	dy <sub>c</sub> /dx	θ	x(U)	x(L)	y(U)	y(L)
1	0,000	0,000	0,000	0,200	0,197	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,133	0,026	0,217	0,133	0,133	0,105	0,162	0,241	-0,189
3	0,267	0,051	0,298	0,067	0,067	0,247	0,286	0,348	-0,246
4	0,400	0,075	0,355	0,000	0,000	0,400	0,400	0,430	-0,280
5	0,533	0,098	0,401	-0,030	-0,030	0,545	0,521	0,498	-0,303
6	0,667	0,119	0,438	-0,059	-0,059	0,693	0,641	0,556	-0,317
7	0,800	0,140	0,468	-0,089	-0,089	0,841	0,759	0,606	-0,326
8	0,933	0,159	0,494	-0,119	-0,118	0,991	0,875	0,650	-0,331
9	1,067	0,178	0,516	-0,148	-0,147	1,142	0,991	0,688	-0,333
10	1,200	0,195	0,535	-0,178	-0,176	1,294	1,106	0,721	-0,331
11	1,333	0,211	0,550	-0,207	-0,205	1,445	1,222	0,750	-0,328
12	1,467	0,226	0,563	-0,237	-0,233	1,597	1,337	0,774	-0,322
13	1,600	0,240	0,574	-0,267	-0,261	1,748	1,452	0,794	-0,314
14	1,733	0,253	0,582	-0,296	-0,288	1,899	1,568	0,811	-0,306
15	1,867	0,264	0,589	-0,326	-0,315	2,049	1,684	0,825	-0,296
16	2,000	0,275	0,594	-0,356	-0,342	2,199	1,801	0,835	-0,285
17	2,133	0,284	0,598	-0,385	-0,368	2,348	1,919	0,842	-0,273
18	2,267	0,293	0,600	-0,415	-0,393	2,496	2,037	0,847	-0,261
19	2,400	0,300	0,600	-0,444	-0,418	2,644	2,156	0,848	-0,248
20	2,533	0,306	0,600	-0,474	-0,443	2,790	2,277	0,848	-0,236
21	2,667	0,311	0,598	-0,504	-0,467	2,936	2,398	0,845	-0,223
22	2,800	0,315	0,595	-0,533	-0,490	3,080	2,520	0,840	-0,210
23	2,933	0,318	0,591	-0,563	-0,513	3,223	2,643	0,833	-0,197
24	3,067	0,319	0,586	-0,593	-0,535	3,365	2,768	0,824	-0,185
25	3,200	0,320	0,580	-0,622	-0,557	3,507	2,893	0,813	-0,173
26	3,333	0,320	0,574	-0,652	-0,578	3,647	3,020	0,800	-0,161
27	3,467	0,319	0,566	-0,681	-0,598	3,786	3,148	0,787	-0,149
28	3,600	0,318	0,558	-0,711	-0,618	3,923	3,277	0,773	-0,137
29	3,733	0,316	0,549	-0,741	-0,638	4,060	3,406	0,757	-0,125
30	3,867	0,314	0,540	-0,770	-0,656	4,196	3,537	0,741	-0,114
31	4,000	0,311	0,529	-0,800	-0,675	4,331	3,669	0,725	-0,102

32	4,133	0,308	0,519	-0,830	-0,693	4,464	3,802	0,707	-0,091
33	4,267	0,304	0,507	-0,859	-0,710	4,597	3,936	0,689	-0,080
34	4,400	0,300	0,495	-0,889	-0,727	4,729	4,071	0,670	-0,070
35	4,533	0,295	0,483	-0,919	-0,743	4,860	4,207	0,651	-0,060
36	4,667	0,290	0,470	-0,948	-0,759	4,990	4,343	0,631	-0,051
37	4,800	0,284	0,456	-0,978	-0,774	5,119	4,481	0,611	-0,042
38	4,933	0,278	0,442	-1,007	-0,789	5,247	4,619	0,590	-0,033
39	5,067	0,272	0,428	-1,037	-0,804	5,375	4,759	0,569	-0,026
40	5,200	0,264	0,413	-1,067	-0,818	5,501	4,899	0,547	-0,018
41	5,333	0,257	0,398	-1,096	-0,831	5,627	5,039	0,525	-0,011
42	5,467	0,249	0,382	-1,126	-0,845	5,753	5,181	0,503	-0,005
43	5,600	0,240	0,366	-1,156	-0,857	5,877	5,323	0,480	0,000
44	5,733	0,231	0,350	-1,185	-0,870	6,001	5,466	0,457	0,005
45	5,867	0,221	0,333	-1,215	-0,882	6,124	5,609	0,433	0,009
46	6,000	0,211	0,316	-1,244	-0,894	6,246	5,754	0,409	0,013
47	6,133	0,200	0,298	-1,274	-0,905	6,368	5,899	0,385	0,016
48	6,267	0,189	0,281	-1,304	-0,916	6,489	6,044	0,360	0,019
49	6,400	0,178	0,262	-1,333	-0,927	6,610	6,190	0,335	0,020
50	6,533	0,166	0,244	-1,363	-0,938	6,730	6,337	0,310	0,022
51	6,667	0,153	0,225	-1,393	-0,948	6,849	6,484	0,284	0,022
52	6,800	0,140	0,205	-1,422	-0,958	6,968	6,632	0,258	0,022
53	6,933	0,126	0,185	-1,452	-0,968	7,086	6,781	0,232	0,021
54	7,067	0,112	0,165	-1,481	-0,977	7,204	6,930	0,205	0,020
55	7,200	0,098	0,145	-1,511	-0,986	7,321	7,079	0,178	0,018
56	7,333	0,083	0,124	-1,541	-0,995	7,437	7,229	0,150	0,015
57	7,467	0,067	0,102	-1,570	-1,004	7,553	7,380	0,122	0,012
58	7,600	0,051	0,081	-1,600	-1,012	7,668	7,532	0,094	0,008
59	7,733	0,035	0,058	-1,630	-1,020	7,783	7,684	0,065	0,004
60	7,867	0,018	0,036	-1,659	-1,028	7,897	7,836	0,036	-0,001
61	8,000	0,000	0,013	-1,689	-1,036	8,011	7,989	0,006	-0,006

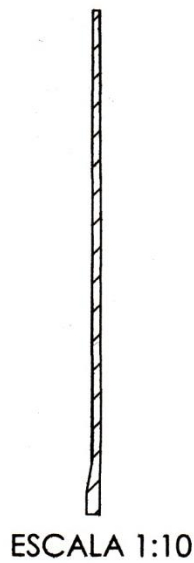


## **2. PLANO DEL MODELO DE PALA PARA TURBINA EÓLICA BASADA EN EL PERFIL NACA 4415**

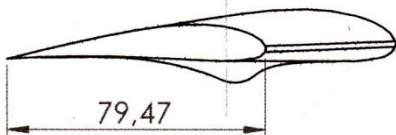
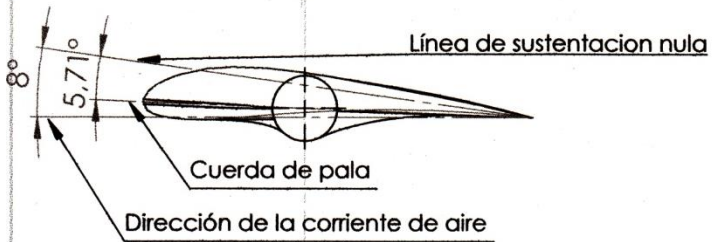
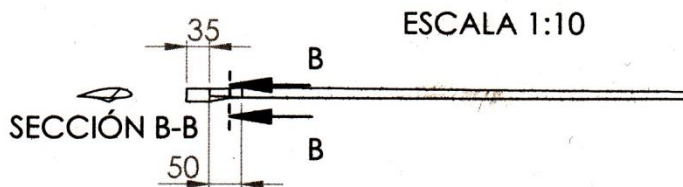
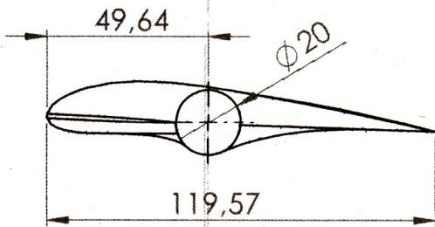
SECCIÓN A-A



SECCIÓN D-D



ESCALA 1:2



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
ACABADO SUPERFICIAL: HSM

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	RAÚL CHÁVEZ		OCTUBRE 2013
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

MODELO DE PALA PARA TURBINAS EÓLICAS  
BASADO EN EL PERFIL NACA 4415

N.º DE DIBUJO: 1

A4

MATERIAL: MADERA DE CIPRÉS

ESCALAS: 1:10; 1:2

HOJA 1 DE 1

### 3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON CFD

#### System Info

Product	Flow Simulation 2012 0.0. Build: 1784
Computer name	CHR-PC
User name	CHR
Processors	Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q8400 @ 2.66GHz
Memory	3033 MB / 0 MB
Operating system	Windows 7 Professional Service Pack 1 (Build 7601)
CAD version	SolidWorks 2012 SP0.0
CPU speed	2664 MHz

#### General Info

Model	D:\CHICHE\Nueva carpeta\int\Diseño Turbinas\Tesis\Perfil 4415\Modelo con CFD\Análisis Flow Simulation\Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8.SLDPRT
Project name	Analisis con CFD
Project path	D:\CHICHE\Nueva carpeta\int\Diseño Turbinas\Tesis\Perfil 4415\Modelo con CFD\Análisis Flow Simulation\12
Units system	SI (m-kg-s)
Analysis type	External (exclude internal spaces)
Exclude cavities without flow conditions	On
Coordinate system	Global coordinate system
Reference axis	X

### INPUT DATA

#### Initial Mesh Settings

Automatic initial mesh: On

Result resolution level: 3

Advanced narrow channel refinement: Off

Refinement in solid region: Off

#### Geometry Resolution

Evaluation of minimum gap size: Automatic

Evaluation of minimum wall thickness: Automatic

#### Computational Domain

Size

X min	-0.048 m
X max	0.191 m
Y min	-0.022 m
Y max	0.041 m
Z min	-0.701 m
Z max	0.050 m

#### Boundary Conditions

2D plane flow	None
At X min	Default
At X max	Default
At Y min	Default
At Y max	Default
At Z min	Default
At Z max	Default

#### Physical Features

Heat conduction in solids: Off

Time dependent: Off

Gravitational effects: Off

Flow type: Laminar and turbulent

High Mach number flow: Off

Humidity: Off

Default roughness: 0 micrometer

Default wall conditions: Adiabatic wall

#### Ambient Conditions

Thermodynamic parameters	Static Pressure: 101325.00 Pa Temperature: 293.20 K
Velocity parameters	Velocity vector Velocity in X direction: 12.000 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s
Turbulence parameters	Turbulence intensity and length Intensity: 0.10 % Length: 2.269e-04 m



## Material Settings

Fluids

Air

## Calculation Control Options

Finish Conditions

Finish conditions	If one is satisfied
Maximum travels	4.000
Goals convergence	Analysis interval: 0.500

Solver Refinement

Refinement: Disabled

Results Saving

Save before refinement	On
------------------------	----

Advanced Control Options

Flow Freezing

Flow freezing strategy	Disabled
------------------------	----------

## RESULTS

### General Info

Iterations: 128

CPU time: 439 s

Log

Mesh generation started	16:17:08 , Sep 05
Mesh generation normally finished	16:17:23 , Sep 05
Preparing data for calculation	16:17:26 , Sep 05
Calculation started 0	16:17:34 , Sep 05
Calculation has converged since the following criteria are satisfied: 127	16:25:05 , Sep 05
Goals are converged 127	
Calculation finished 128	16:25:13 , Sep 05

### Calculation Mesh

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	51
Number of cells in Y	12
Number of cells in Z	166

Number Of Cells

Total cells	102817
Fluid cells	93975
Solid cells	1390
Partial cells	7452
Irregular cells	0
Trimmed cells	0

Maximum refinement level: 1

**Min/Max Table**

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	101249.28	101418.30
Temperature [K]	293.17	293.27
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.20	1.20
Velocity [m/s]	0	14.126
Velocity (X) [m/s]	0	13.818
Velocity (Y) [m/s]	-6.158	6.980
Velocity (Z) [m/s]	-10.576	7.729
Temperature (Fluid) [K]	293.17	293.27
Mach Number [ ]	0	0.04
Vorticity [1/s]	0.058	2518.537
Shear Stress [Pa]	0	2.09
Heat Transfer Coefficient [W/m <sup>2</sup> /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m <sup>2</sup> ]	0	0

**Engineering Database**

**Gases**

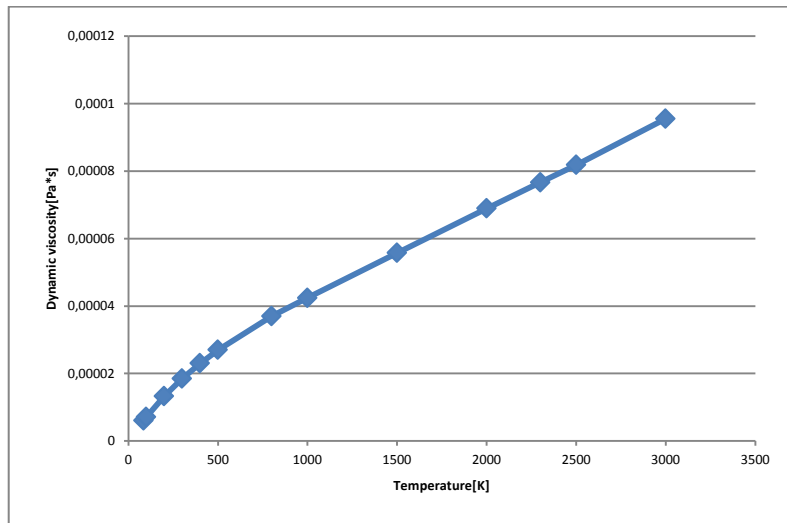
Air

Path: Gases Pre-Defined

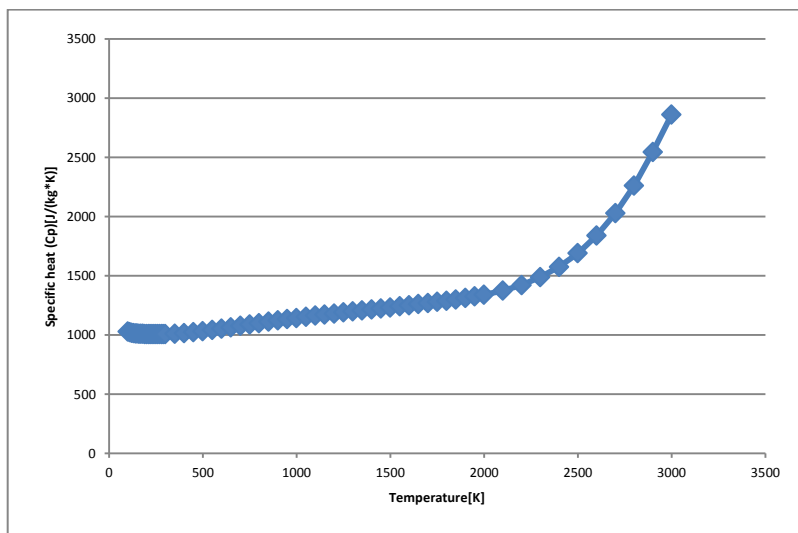
Specific heat ratio ( $C_p/C_v$ ): 1.399

Molecular mass: 0.0290 kg/mol

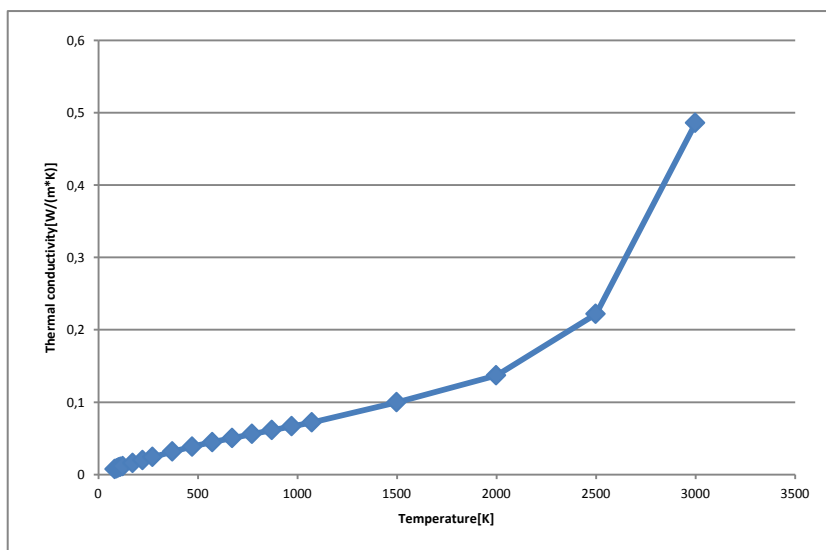
Dynamic viscosity



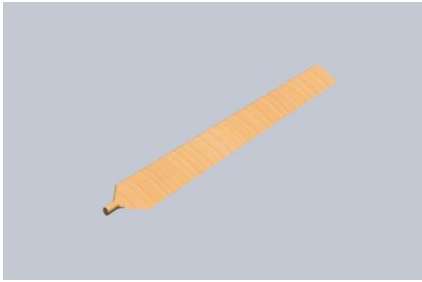
Specific heat ( $C_p$ )



Thermal conductivity



## 4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO



**Simulación de Modelo con Perfil NACA 4415  
modif angulo ataque 8 con balsa**

**Fecha: domingo, 01 de diciembre de 2013**

**Diseñador: Solidworks**

**Nombre de estudio:Estudio 1**

**Tipo de análisis:Estático**

Table of Contents

Descripción **¡Error! Marcador no definido.**

Suposiciones **¡Error! Marcador no definido.**

Información de modelo 298

Propiedades del estudio 298

Unidades 299

Propiedades de material 300

Cargas y sujeciones 300

Definiciones de conector **¡Error! Marcador no definido.**

Información de contacto 301

Información de malla 301

Detalles del sensor **¡Error! Marcador no definido.**

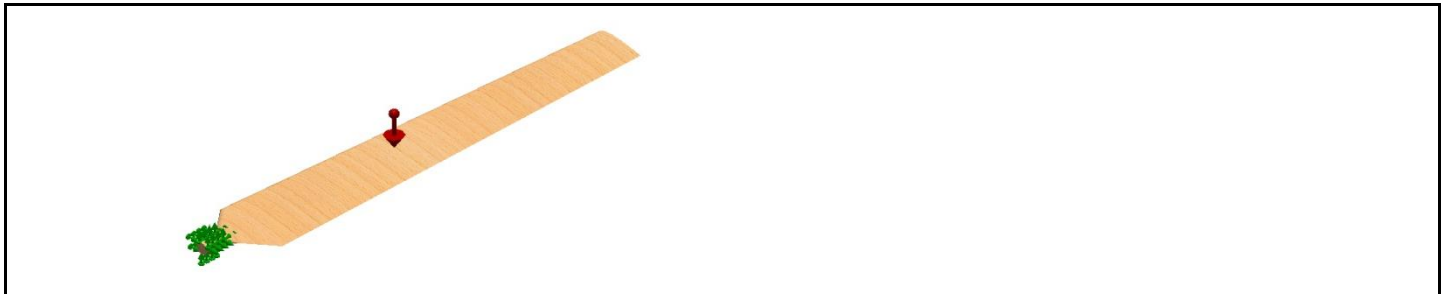
Fuerzas resultantes 302

Vigas **¡Error! Marcador no definido.**

Resultados del estudio 302

Conclusión **¡Error! Marcador no definido.**

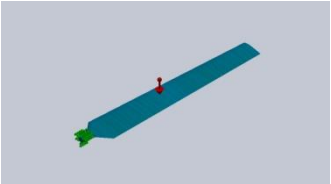
Información de modelo



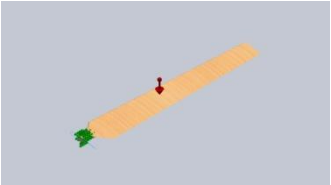
Nombre del modelo: Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa

Configuración actual: Analisis con CFD

Sólidos

<L_MdInf_SldBd_Nm/>	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Redondeo13 	Sólido	Masa:0.0944523 kg Volumen:0.000590364 m <sup>3</sup> Densidad:159.99 kg/m <sup>3</sup> Peso:0.925633 N	D:\CHICHE\Nueva carpeta\int\Diseño Turbinas\Tesis\Perfil 4415\Modelo con CFD\Análisis estático y fatiga Balsa\Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa.SLDPRT Nov 26 12:49:24 2013

Vaciados

<L_MdInf_Sh1Bd_Nm/>	Formulación	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Superficie-Rellenar3 	Delgado	Espesor:0 mm Peso:0 N Volumen:0 m <sup>3</sup> Masa:0 kg Densidad:-1.#INDkg/m <sup>3</sup>	D:\CHICHE\Nueva carpeta\int\Diseño Turbinas\Tesis\Perfil 4415\Modelo con CFD\Análisis estático y fatiga Balsa\Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa.SLDPRT Nov 26 12:49:24 2013

Propiedades del estudio

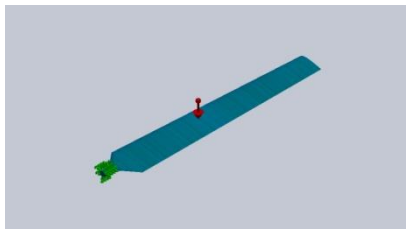
<b>Nombre de estudio</b>	Estudio 1
<b>Tipo de análisis</b>	Estático
<b>Tipo de malla</b>	Malla sólida
<b>Efecto térmico:</b>	Activar

<b>Opción térmica</b>	Incluir cargas térmicas
<b>Temperatura a tensión cero</b>	298 Kelvin
<b>Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SolidWorks Flow Simulation</b>	Activar
<b>Tipo de solver</b>	FFEPlus
<b>Efecto de rigidización por tensión (Inplane):</b>	Desactivar
<b>Muelle blando:</b>	Desactivar
<b>Desahogo inercial:</b>	Desactivar
<b>Opciones de unión rígida incompatibles</b>	Automática
<b>Gran desplazamiento</b>	Desactivar
<b>Calcular fuerzas de cuerpo libre</b>	Activar
<b>Fricción</b>	Desactivar
<b>Utilizar método adaptativo:</b>	Desactivar
<b>Carpeta de resultados</b>	Documento de SolidWorks (D:\CHICHE\Nueva carpeta\int\Diseño Turbinas\Tesis\Perfil 4415\Modelo con CFD\Análisis estático y fatiga Balsa)

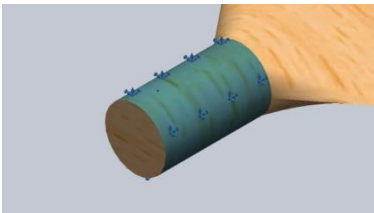
#### Unidades

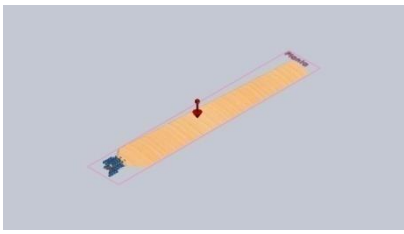
<b>Sistema de unidades:</b>	Métrico (MKS)
<b>Longitud/Desplazamiento</b>	mm
<b>Temperatura</b>	Kelvin
<b>Velocidad angular</b>	Rad/seg
<b>Presión/Tensión</b>	N/m <sup>2</sup>

Propiedades de material

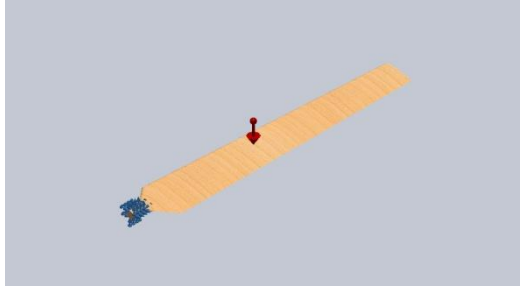
	<p>Nombre: <b>Balsa</b></p> <p>Tipo de modelo: <b>Isotrópico elástico lineal</b></p> <p>Criterio de error: <b>Desconocido</b></p> <p>predeterminado:</p> <p>Límite elástico: <b>2e+007 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Módulo elástico: <b>3e+009 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Coefficiente de Poisson: <b>0.29</b></p> <p>Densidad: <b>159.99 kg/m<sup>3</sup></b></p> <p>Módulo cortante: <b>3e+008 N/m<sup>2</sup></b></p>	<p><b>Sólido 2(Redondeo13)(Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa)</b></p>
<p>Datos de curva:N/A</p>		

Cargas y sujeciones

<p>Fijo-1</p>		<p>Entidades: <b>1 cara(s)</b></p> <p>Tipo: <b>Geometría fija</b></p>		
<p>Fuerzas resultantes</p>				
<p><b>Componentes</b></p>	<p><b>X</b></p>	<p><b>Y</b></p>	<p><b>Z</b></p>	<p><b>Resultante</b></p>
<p><b>Fuerza de reacción(N)</b></p>	<p><b>-0.00111027</b></p>	<p><b>0.926241</b></p>	<p><b>-0.000436783</b></p>	<p><b>0.926242</b></p>
<p><b>Momento de reacción(N-m)</b></p>	<p><b>0</b></p>	<p><b>0</b></p>	<p><b>0</b></p>	<p><b>0</b></p>

<p>Gravedad-1</p>		<p>Referencia: <b>Planta</b></p> <p>Valores: <b>0 0 -9.81</b></p> <p>Unidades: <b>SI</b></p>

Información de contacto

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
Contacto global		<b>Tipo:</b> Unión rígida <b>Componentes:</b> 1 componente(s) <b>Opciones:</b> Mallado compatible

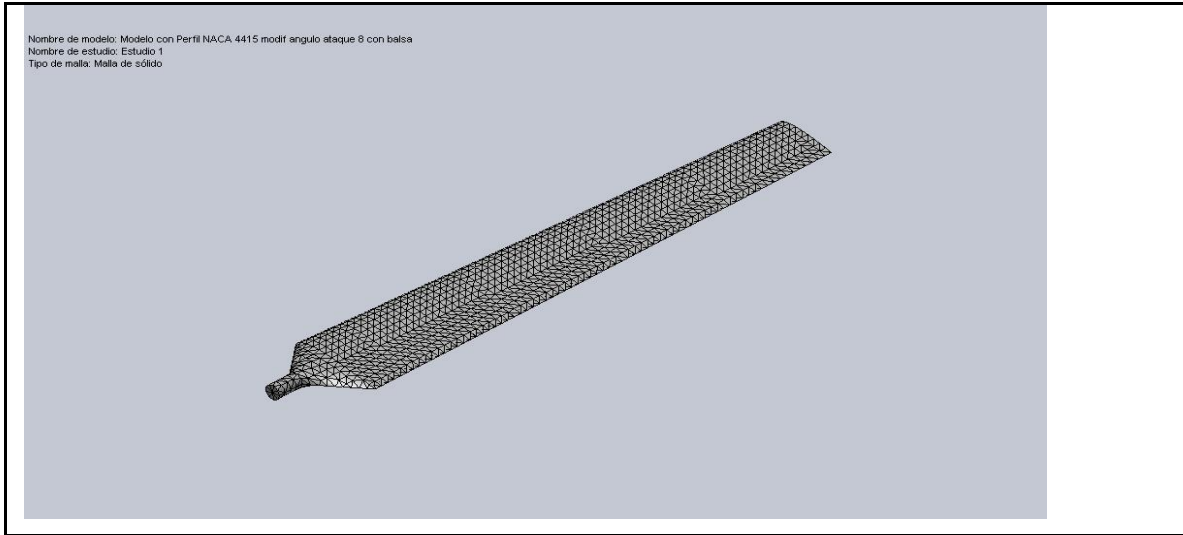
Información de malla

<b>Tipo de malla</b>	Malla sólida
<b>Mallador utilizado:</b>	Malla estándar
<b>Transición automática:</b>	Desactivar
<b>Incluir bucles automáticos de malla:</b>	Desactivar
<b>Puntos jacobianos</b>	4 Puntos
<b>Tamaño de elementos</b>	9.65749 mm
<b>Tolerancia</b>	0.482875 mm
<b>Calidad de malla</b>	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

<b>Número total de nodos</b>	12497
<b>Número total de elementos</b>	6648
<b>Cociente máximo de aspecto</b>	26.985
<b>% de elementos cuyo cociente de aspecto es &lt; 3</b>	82.4
<b>% de elementos cuyo cociente de aspecto es &gt; 10</b>	0.421
<b>% de elementos distorsionados (Jacobiana)</b>	0
<b>Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):</b>	00:00:04
<b>Nombre de computadora:</b>	CHR-PC





Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

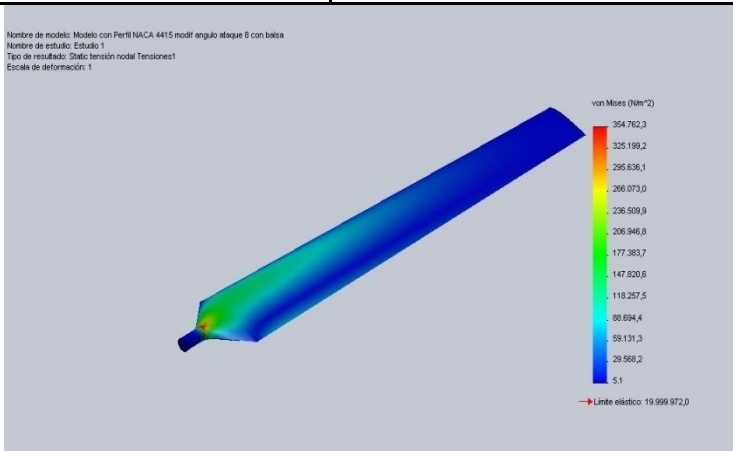
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.00111027	0.926241	-0.000436783	0.926242

Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N-m	0	0	0	0

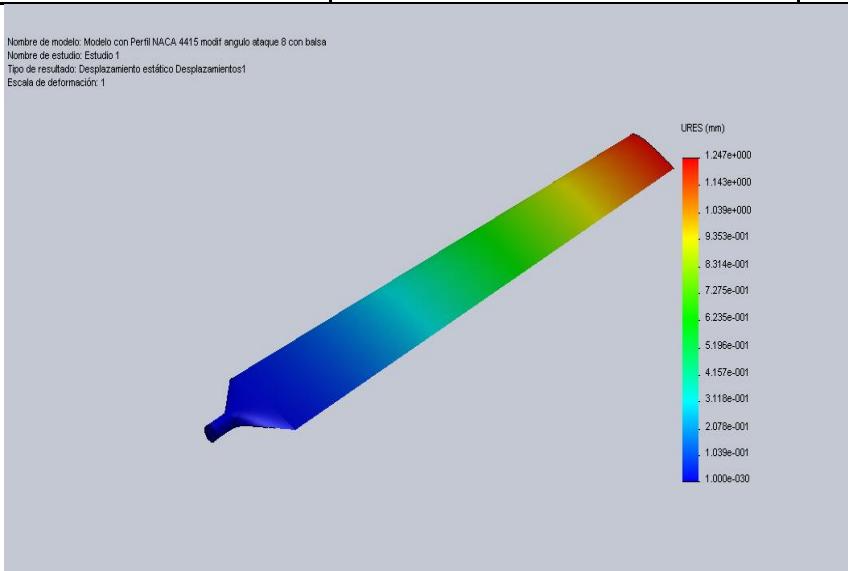
Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	5.11731 N/m <sup>2</sup> Nodo: 12291	354762 N/m <sup>2</sup> Nodo: 12413



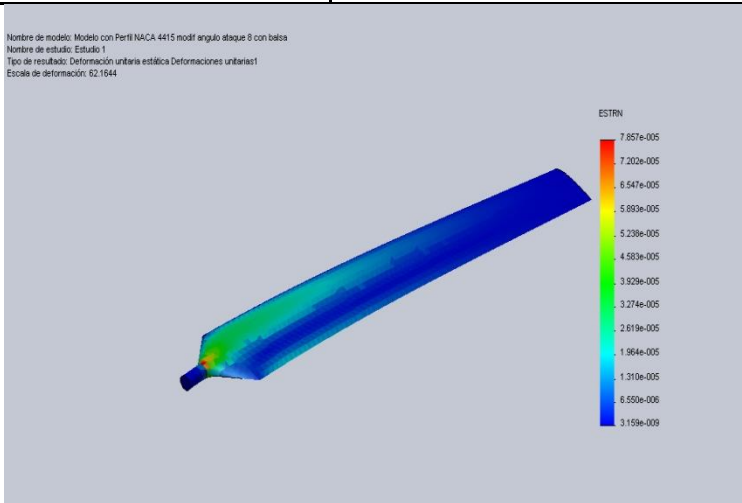
Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa-Estudio 1-Tensiones-Tensiones1

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
<b>Desplazamientos1</b>	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 1	1.24709 mm Nodo: 31



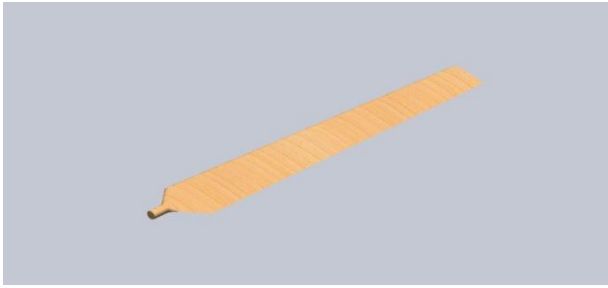
Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
<b>Deformaciones unitarias1</b>	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	3.15929e-009 Elemento: 4186	7.85677e-005 Elemento: 2902



Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa-Estudio 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1

## 5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FATIGA



**Simulación de Modelo con Perfil NACA 4415  
modif angulo ataque 8 con balsa**

**Fecha: domingo, 01 de diciembre de 2013**

**Diseñador: Solidworks**

**Nombre de estudio:Estudio 2**

**Tipo de análisis:Fatiga(Amplitud constante)**

Table of Contents

Descripción **¡Error! Marcador no definido.**

Suposiciones **¡Error! Marcador no definido.**

Información de modelo 305

Propiedades del estudio 305

Unidades 306


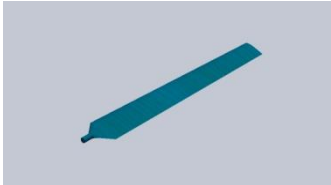

Propiedades de material 306

Opciones de carga 307

Resultados del estudio 307

Conclusión **¡Error! Marcador no definido.**

Información de modelo

			
Nombre del modelo: Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa Configuración actual: Analisis con CFD			
Sólidos			
<L_MdInf_SldBd_Nm/>	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Redondeo13 	Sólido	Masa:0.0944523 kg Volumen:0.000590364 m <sup>3</sup> Densidad:159.99 kg/m <sup>3</sup> Peso:0.925633 N	D:\CHICHE\Nueva carpeta\int\Diseño Turbinas\Tesis\Perfil 4415\Modelo con CFD\Análisis estático y fatiga Balsa\Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa.SLDPRT Nov 26 12:49:24 2013
Vaciados			
<L_MdInf_ShIbD_Nm/>	Formulación	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Superficie-Rellenar3 	Delgado	Espesor:0 mm Peso:0 N Volumen:0 m <sup>3</sup> Masa:0 kg Densidad:-1.#INDkg/m <sup>3</sup>	D:\CHICHE\Nueva carpeta\int\Diseño Turbinas\Tesis\Perfil 4415\Modelo con CFD\Análisis estático y fatiga Balsa\Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa.SLDPRT Nov 26 12:49:24 2013

Propiedades del estudio

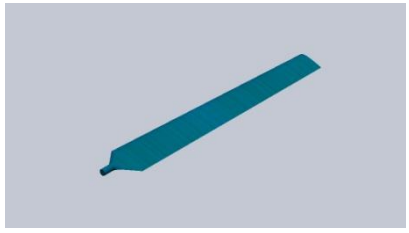
<b>Nombre de estudio</b>	Estudio 2
<b>Tipo de análisis</b>	Fatiga(Amplitud constante)
<b>Interacción entre sucesos</b>	Aleatoria
<b>Calcular tensiones alternas usando</b>	Intensidad de tensión (P1-P3)
<b>Cara de elemento SHELL</b>	Cara superior
<b>Corrección de la tensión media</b>	Ninguna

<b>Factor de reducción de resistencia a la fatiga</b>	1
<b>Vida infinita</b>	Desactivar
<b>Carpeta de resultados</b>	Documento de SolidWorks (D:\CHICHE\Nueva carpeta\int\Diseño Turbinas\Tesis\Perfil 4415\Modelo con CFD\Análisis estático y fatiga Balsa)

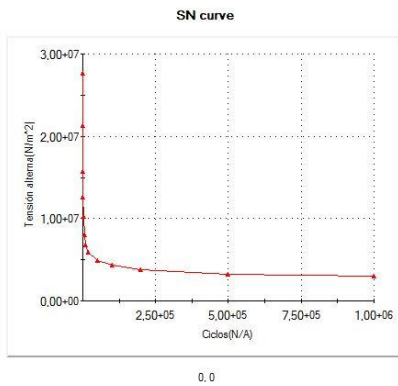
Unidades

<b>Sistema de unidades:</b>	Métrico (MKS)
<b>Longitud/Desplazamiento</b>	mm
<b>Temperatura</b>	Kelvin
<b>Velocidad angular</b>	Rad/seg
<b>Presión/Tensión</b>	N/m <sup>2</sup>

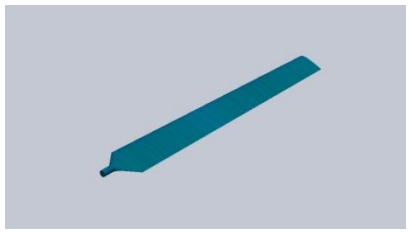
Propiedades de material

	Nombre: <b>Balsa P</b> Tipo de modelo: <b>Isotrópico elástico lineal</b> Criterio de error <b>Desconocido</b> predeterminado:	<b>Sólido 2(Redondeo13)(Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa)</b>
--	--	--

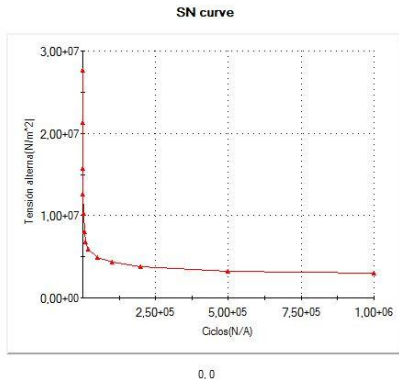
Datos de curva:



SN curve

	Nombre: <b>Balsa P</b> Tipo de modelo: <b>Isotrópico elástico lineal</b> Criterio de error <b>Desconocido</b> predeterminado:	<b>Sólido 2(Redondeo13)(Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa)</b>
---	--	--

Datos de curva:



SN curve

Opciones de carga

Suceso-1	<b>1000</b>	Completamente invertida (LR=-1)	Nombre de estudio	Factor de escala
			Estudio 1	1
				Paso
				0

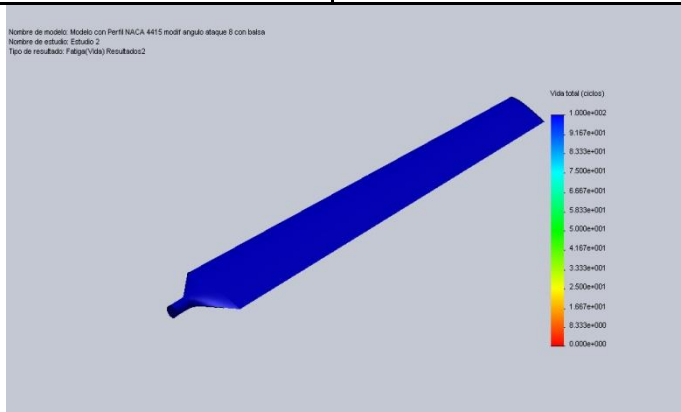
Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Resultados1	Daño acumulado	0.1	0.1
		Nodo: 1	Nodo: 1

Nombre de modelo: Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa  
 Nombre de estudio: Estudio 2  
 Tipo de resultado: Falga(Daño) Resultados1

Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa-Estudio 2-Resultados-Resultados1

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Resultados2	Vida total	1e+006 ciclos Nodo: 1	1e+006 ciclos Nodo: 1



Modelo con Perfil NACA 4415 modif angulo ataque 8 con balsa-Estudio 2-Resultados-Resultados2

## 6. MECANIZADO DEL MODELO

### - PRUEBAS DE MECANIZADO



### - MECANIZADO DEL MODELO FINAL





## 7. PROYECTO DE TESIS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS  
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROYECTO DE TESIS

TITULO:

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PALAS DE  
TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL DE RADIO MÁXIMO  
80cm BASADOS EN PERFILES ALARES NACA, APLICANDO  
TECNOLOGÍA CAD-CAM-CNC

AUTOR:

Raúl Alberto Chávez Romero

LOJA-ECUADOR

Julio 2012

**A. TITULO**

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PALAS DE  
TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL DE RADIO MÁXIMO  
80cm BASADOS EN PERFILES ALARES NACA, APLICANDO  
TECNOLOGÍA CAD-CAM-CNC

## **B. PROBLEMÁTICA**

### **B.1. Antecedentes**

Hoy en día algo imprescindible para el desarrollo de cualquier sociedad, es la energía, y en concreto la energía eléctrica; con ella se hace uso de algo tan simple como una lámpara hasta algo complejo como un sistema de ensamblaje de automóviles. La energía eléctrica es utilizada en el hogar, para electrodomésticos; en la industria, para energizar potentes motores que entregan energía mecánica a una máquina mezcladora por ejemplo; en el alumbrado público; es decir una infinidad de aplicaciones, que sin esta no se podrían concebir.

Para tener la energía eléctrica a nuestra disposición, y utilizarla en una actividad específica, existe un proceso que consta de las siguientes etapas:

Generación, Elevación de tensión, Transporte, Reducción de tensión, Distribución

En la etapa de generación se pueden utilizar diversas energías para ser transformadas y así obtener electricidad; energía química (combustibles) para calentar agua, obtener energía cinética (vapor), luego transformar esta a energía mecánica en una turbina y finalmente esta turbina es acoplada a un generador el cual entrega energía eléctrica; así hay muchas formas de generación de energía eléctrica, tales como la hidráulica, eólica, térmica, nuclear, solar, etc.

Un elemento importante en la mayoría de formas de generación de energía eléctrica es la turbina, esta puede ser de vapor, eólica, hidráulica, dependiendo de la fuente de energía. Así pues, el diseño de cada una en función de la forma de generación es diferente. Es decir, los álabes, la disposición de estos, el tamaño y otras características, de una turbina hidráulica, son diferentes de las características de una que es a vapor, o una que es eólica.

La energía eólica hoy en día es muy utilizada, tal es el caso, que existen grandes parques eólicos, con aerogeneradores de capacidades comprendidas en Mega Vatios (MW), en países como Estados Unidos, Alemania, China, España, entre otros.

Actualmente, los Ingenieros mecánicos a nivel mundial trabajan en el diseño de turbinas ya sea mejorando las existentes, o creando nuevas. De este modo intentan aprovechar toda la energía de la fuente, tratando de disminuir las pérdidas. Tales son los casos de ingenieros de empresas como: Vestas (Dinamarca), Enercon (Alemania), Gamesa (España), GE Energy (Alemania / EE. UU.), Siemens (Dinamarca / Alemania), Suzlon (India), Nordex (Alemania), Acciona (España), REpower (Alemania), Goldwind (China), RENOVAENERGIA S.A. (Ecuador), entre otras.

Cabe mencionar que actualmente existen perfiles de alas para avión, que son utilizados para el diseño de hélices de turbinas eólicas, tal es el caso de los perfiles de NACA (Comité Consultivo Nacional para la Aeronáutica), que ha venido desarrollando desde 1929 diferentes estudios en este campo. NACA ha puesto a disposición, algunas series de perfiles. Las primeras series estudiadas fueron las llamadas “de cuatro dígitos”. El primero de los dígitos daba la curvatura en porcentaje de la cuerda; el segundo daba la posición de la curvatura máxima en décimas de la cuerda y los dos últimos dígitos el espesor máximo en porcentaje de la cuerda. El desarrollo posterior llevó a las series de cinco dígitos, “series 1”, y, con la llegada de altas velocidades, los denominados de flujo laminar, estos corresponden a las “series 6 y 7”.

## **B.2. Situación problemática**

En nuestro medio la falta de tecnología para el diseño y procesos de construcción, nos obliga a importar de países desarrollados, esto impide que se generen plazas de trabajo, y que se invierta en nuestro país; debido a que los profesionales no investigan en estos campos, para ofrecer propuestas que den solución a la demanda de productos extranjeros.

En concreto al referirse al diseño y construcción de turbinas ya sea tipo eólico, hidráulico o de vapor, en nuestro país es poca la investigación que se realiza. En la ciudad de Loja, no existen empresas, centros de investigación y desarrollo que generen una metodología para el diseño de estos elementos, y por ende tampoco su construcción.

Adicionalmente, se puede mencionar que las características de nuestra región, son óptimas para proyectos destinados a aprovechar los recursos eólicos, tal es el caso del sector

Villonaco, el cual principalmente por su altura (2720m) y velocidad de viento (12 m/s), tiene una de las mejores potencialidades en cuanto a energía eólica en Latinoamérica.

En la actualidad existen perfiles de alas para avión, que pueden ser aplicados para la construcción de palas de turbinas de aerogeneradores, tal es el caso de los perfiles alares desarrollados por el departamento estadounidense NACA (Comité Consultivo Nacional para la Aeronáutica), los cuales están clasificados de acuerdo a su número de serie. La importancia de estos es que de acuerdo a su número de serie, se puede tener el perfil geométrico de una manera práctica, esto simplifica los tediosos e interminables análisis de diseño mecánico para determinar dicho perfil.

### **B.3. Problema de investigación**

El problema de investigación que se ha planteado es el siguiente:

**No existe un proceso metodológico en cuanto al diseño o construcción de palas para aerogeneradores que permitan aprovechar los recursos eólicos de la ciudad de Loja.**

## **C. JUSTIFICACIÓN**

### **C.1. Justificación:**

El presente proyecto de investigación tiene como fin realizar un diseño adecuado tomando en cuenta parámetros técnicos y de ingeniería, para construir palas para una turbina eólica tipo horizontal, mediante CAD, CAM y CNC. Esto permitirá establecer un tipo de metodología tanto para la etapa de diseño como para la de construcción, que puede servir para otros proyectos, además se pretende crear una guía para la parte de mecanizado utilizando la fresadora CNC del taller mecánico de la UNL.

Este proyecto al finalizar, podría ser utilizado para ser probado y verificado de forma práctica por otros estudiantes, ampliando así el tema, creando nuevos proyectos que puedan tener mayor alcance.

Con los resultados y con la experiencia obtenida al final de este trabajo, se podrían analizar otro tipo de perfiles para su posterior construcción y evaluación, para encontrar uno que pueda ofrecer un mejor rendimiento.

### **C.2. Viabilidad:**

Este proyecto al utilizar en la mayor parte de su ejecución, software, no presentará gastos elevados.

Además se cuenta con los referentes teóricos que intervienen en el análisis, tal como estática, dinámica, resistencia de materiales, diseño mecánico, los mismos que están relacionados estrechamente con la carrera. Así como también el uso de software CAD y CNC.

El tiempo del que se dispone es el suficiente como para poder desarrollar las tareas sin inconvenientes.

## **D. OBJETIVOS**

### **D.1. Objetivo general**

Elaborar una metodología para el diseño y construcción de palas de aerogeneradores de eje horizontal tipo NACA 4415 de 80cm de radio máximo, utilizando tecnología CAD-CAM-CNC.

### **D.2. Objetivos específicos**

- Sistematizar la información sobre la aplicación de perfiles tipo NACA.
- Diseñar una pala para turbinas eólicas de eje horizontal, utilizando el perfil tipo NACA 4415, bajo criterios de diseño asistido por computadora (CAD).
- Elaborar un algoritmo metodológico para la construcción de la pala mencionada, mediante tecnología CAM-CNC.
- Aplicar una prueba de interacción del modelo con el aire, utilizando software de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) y construir el modelo.

## **E. MARCO TEÓRICO**

### **E.1. Energía Eléctrica**

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos —cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico— y obtener trabajo. La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía luminosa o luz, la energía mecánica y la energía térmica.

La energía eléctrica sin duda es el energético más utilizado en el mundo. La electricidad es el pilar del desarrollo industrial de todos los países, parte importante del desarrollo social, y elemento esencial para el desarrollo tecnológico.

Sin duda la electricidad juega un papel muy importante en la vida del ser humano, con la electricidad se establece una serie de comodidades que con el transcurso de los años se van haciendo indispensables para el hombre.

La energía eléctrica, cumple con un determinado proceso antes de poder llegar a los distintos lugares, tales como oficinas, viviendas, fábricas, etc., en donde se la utiliza para una aplicación distinta. Este proceso se puede resumir en el siguiente gráfico:



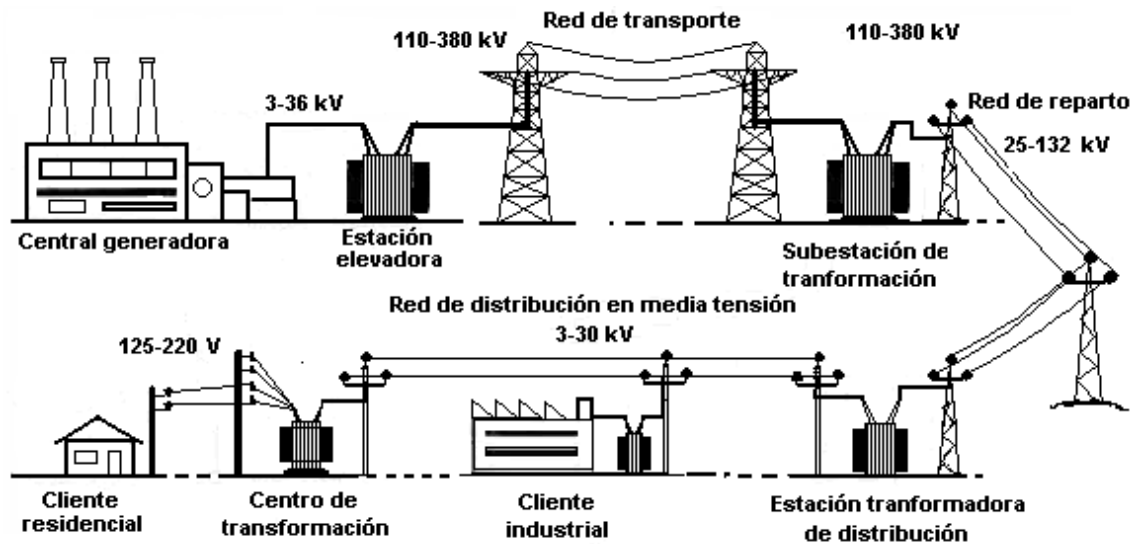


Figura 1. Diagrama esquematizado del sistema de suministro eléctrico

## E.1.1. Generación de Energía Eléctrica

Actualmente la energía eléctrica se puede obtener de distintos medios:

- Centrales termoeléctricas
- Centrales hidroeléctricas
- Centrales geo-termo-eléctricas
- Centrales nucleares
- Centrales de ciclo combinado
- Centrales de turbo-gas
- Centrales eólicas
- Centrales solares

### E.1.1.1. Energía eólica

Es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transmutada en otras formas útiles para las actividades humanas.

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. A finales de 2011, la capacidad mundial de los

generadores eólicos fue de 238 GW. En 2011 la energía eólica generó alrededor del 3% del consumo de electricidad mundial. En España la energía eólica produjo un 16% del consumo eléctrico en 2011. En la madrugada del 19 de abril de 2012, la energía eólica alcanzó el 61,06% de la electricidad producida en España, con una potencia instantánea de 14.889MW respecto a los 24.384MW demandados por la red eléctrica.

La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde. Sin embargo, el principal inconveniente es su intermitencia.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Los vientos son generados a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar, entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento. De día, las masas de aire sobre los océanos, los mares y los lagos se mantienen frías con relación a las áreas vecinas situadas sobre las masas continentales.

Los continentes absorben una menor cantidad de luz solar, por lo tanto el aire que se encuentra sobre la tierra se expande, y se hace por lo tanto más liviana y se eleva. El aire más frío y más pesado que proviene de los mares, océanos y grandes lagos se pone en movimiento para ocupar el lugar dejado por el aire caliente.

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "*cut-in speed*", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada "*cut-out speed*".

La energía del viento es utilizada mediante el uso de máquinas eólicas (o aeromotores) capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación utilizable, ya sea para accionar directamente las máquinas operatrices, como para la producción de energía eléctrica. En este último caso, el sistema de conversión, (que comprende un generador eléctrico con sus sistemas de control y de conexión a la red) es conocido como aerogenerador.

En la actualidad se utiliza, sobre todo, para mover aerogeneradores. En estos la energía eólica mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que produce energía eléctrica. Para que su instalación resulte rentable, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos.

La energía eólica no es algo nuevo, es una de las energías más antiguas junto a la energía térmica. El viento como fuerza motriz existe desde la antigüedad y en todos los tiempos ha sido utilizado como tal, como podemos observar. Tiene su origen en el sol. Así, ha movido a barcos impulsados por velas o ha hecho funcionar la maquinaria de los molinos al mover sus aspas. Pero, fue a partir de los ochenta del siglo pasado, cuando este tipo de energía limpia sufrió un verdadero impulso. La energía eólica crece de forma imparable a partir del siglo XXI, en algunos países más que en otros, pero sin duda alguna en España existe un gran crecimiento, siendo uno de los primeros países por debajo de Alemania a nivel europeo o de Estados Unidos a escala mundial.

A través del tiempo, los medios para aprovechar la energía eólica y las aplicaciones de la misma han ido sufriendo cambios. En el principio era utilizada para mover grandes molinos, luego se usó para el bombeo de agua, y conforme se desarrolló la energía eléctrica, se empezaron a diseñar turbinas eólicas, las turbinas modernas fueron desarrolladas a comienzos de 1980, si bien, los diseños continúan desarrollándose.

## **E.2. Turbinas**

Turbina es el nombre genérico que se da a la mayoría de las turbomáquinas motoras. Éstas son máquinas de fluido, a través de las cuales pasa un fluido en forma continua y éste le entrega su energía a través de un rodete con paletas o álabes.

Es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas. El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice.

Las turbinas constan de una o dos ruedas con paletas, denominadas rotor, el rotor, impulsado por el fluido arrastra el eje en el que se obtiene el movimiento de rotación.

Hasta el momento, la turbina es uno de los motores más eficientes que existen (alrededor del 50%) con respecto a los motores de combustión interna y hasta algunos eléctricos.

### **E.2.1. Turbinas Eólicas**

Una turbina eólica o turbina de viento es una turbina accionada por la energía eólica. Se trata de una turbomáquina motora que intercambia cantidad de movimiento con el viento, haciendo girar un rotor. La energía mecánica del eje del rotor puede ser aprovechada para diversas aplicaciones como moler, en el caso de los molinos de viento; bombear agua, en el caso de las aerobombas; o para la generación de energía eléctrica, en los aerogeneradores.

Las turbinas eólicas se clasifican, según la orientación del eje del rotor, en verticales y horizontales.

#### **E.2.1.1. Turbinas Eólicas tipo horizontal**

Como su nombre lo indica, el eje de rotación es horizontal, por lo cual el plano de rotación de las palas es perpendicular a la superficie en donde las turbinas están situadas.

#### **Tipos:**

##### **Molino de viento**

Los molinos de viento son estructuras bajas, generalmente de cuatro aspas, que se construyeron en Europa a partir del siglo XII. Quizá sean los más famosos y conocidos y,

entre ellos y gracias a Don Quijote, los de La Mancha, pero los había por todas partes aunque muy especialmente en España, donde las corrientes de los ríos no eran tan importantes como en otros países europeos.

### **Multipala**

El molino multipala se utiliza para bombear agua y fue de enorme utilidad en el siglo XIX. En Estados Unidos, el desarrollo de molinos de bombeo fue el factor principal que permitió la agricultura y la ganadería en bastas áreas de Norteamérica, de otra manera imposible sin acceso fácil al agua. Estos molinos contribuyeron a la expansión del ferrocarril alrededor del mundo, supliendo las necesidades de agua de las locomotoras a vapor.

### **Aerogenerador**

Las turbinas eólicas modernas, conocidas también como aerogeneradores tienen su origen en Dinamarca en la década de 1980. Hoy en día la industria eólica utiliza generadores con rotores de hasta 126 metros de diámetro fabricados con alta tecnología. Son usadas en parques eólicos para la producción comercial de electricidad. La gran mayoría tiene tres palas, están pintadas de un tono claro, tienen una eficiencia alta y están controladas por computadora.

### **Ventajas y Desventajas**

#### **Ventajas**

Extremos de pala variable, lo que da a las hojas el ángulo de ataque óptimo. Permitir que el ángulo de ataque sea vagamente ajustado proporciona gran control, de modo que la turbina puede recoger la máxima cantidad de energía eólica de cada día y estación.

Las torres altas permiten acceder a vientos más fuertes en sitios con cizalladura. En algunos lugares, cada 10 metros de altura, la velocidad del viento se incrementa un 20%.

#### **Desventajas**

Las turbinas horizontales tienen problemas para funcionar cerca del suelo, debido a las turbulencias.

Las torres altas y las palas largas son difíciles de transportar. El transporte puede costar un 20% del costo de equipamiento.

Las turbinas altas son difíciles de instalar y necesitan grúas poderosas y operadores hábiles.

Las turbinas altas pueden afectar los radares de los aeropuertos.

Presentan impacto visual en el entorno, y con frecuencia suscitan reclamaciones por afeamiento del paisaje.

Exigen un control cuidadoso, de lo contrario, son propensas a la fatiga de material y los daños estructurales.

Tienen que orientarse hacia el viento.



Figura 2. Aerogenerador con eje horizontal.

#### **E.2.1.1.1. Aerogeneradores horizontales.**

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un

rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.

Ya en la primera mitad del siglo XX, la generación de energía eléctrica con rotores eólicos fue bastante popular en casas aisladas situadas en zonas rurales.

En Europa se distingue claramente un modelo centro-europeo, donde los aerogeneradores llegan a ubicarse en pequeñas agrupaciones en las cercanías de las ciudades alemanas, danesas, neerlandesas, y un modelo español, donde los aerogeneradores forman agrupaciones (a veces de gran tamaño) en las zonas montañosas donde el viento es frecuente, normalmente alejadas de los núcleos de población.

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado la viabilidad industrial, y nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

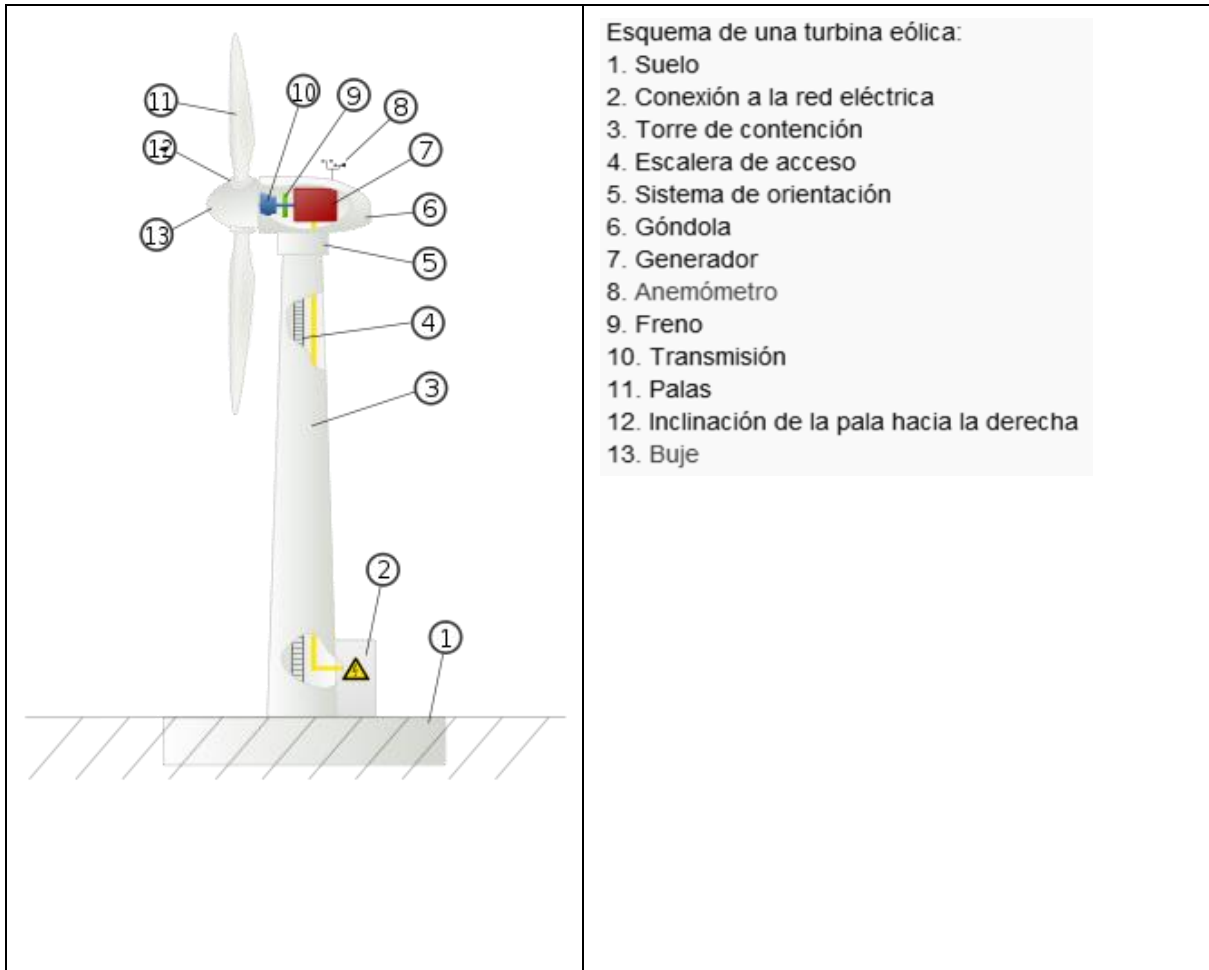


Figura 3. Partes de un aerogenerador

### E.2.1.1.2. Cálculo de la hélices o palas de un aerogenerador

- Diámetro de la hélice:

La potencia eléctrica  $P_e$  que puede generar una turbina eólica es:

$$P_e = C_p \eta_g \eta_t \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (1)$$

Donde:

$C_p$ = Coeficiente de potencia de la hélice ( $C_p$  recomendado = 0.4).

$\eta_g$ = Rendimiento del generador eléctrico (Óptimo=0.9; Automotor=0.5).



$\eta_t$  = Rendimiento de transmisión (Si la turbina posee un multiplicador de velocidad de giro, 0.9 para caja de engranajes, 0.85 para cadenas, 0.8 para correas. Si tiene transmisión directa 1).

$\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$  densidad del aire al nivel del mar.

V = Velocidad del viento.

$A = \frac{\pi D^2}{4}$  = Área barrida por la hélice.

D = Diámetro de la hélice.

- Coeficiente de Solidez  $\Omega$ :

Para determinar la solidez, se debe tomar en cuenta un factor correspondiente a la Relación de velocidad específica o periférica (TSR), el cual se toma de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1. Máquinas de viento de eje horizontal

Tipo de máquina	TSR de diseño	Tipo de pala	$C_p/C_x$
Bombeo de agua	1	Placa plana	10
	1	Placa curvada	20-40
	1	Ala de tela	10-25
Generadores eólicos pequeños	3-4	Perfil simple	10-50
	4-6	Perfil alabeado	20-100
	3-5	Ala de tela	20-30
Generadores eólicos grandes	5-15	Perfil alabeado	20-100

La solidez de la hélice S es la relación entre la superficie  $A_p$  ocupada por las palas y la superficie frontal barrida por la hélice A. Para determinar este coeficiente se puede recurrir a la siguiente grafica.

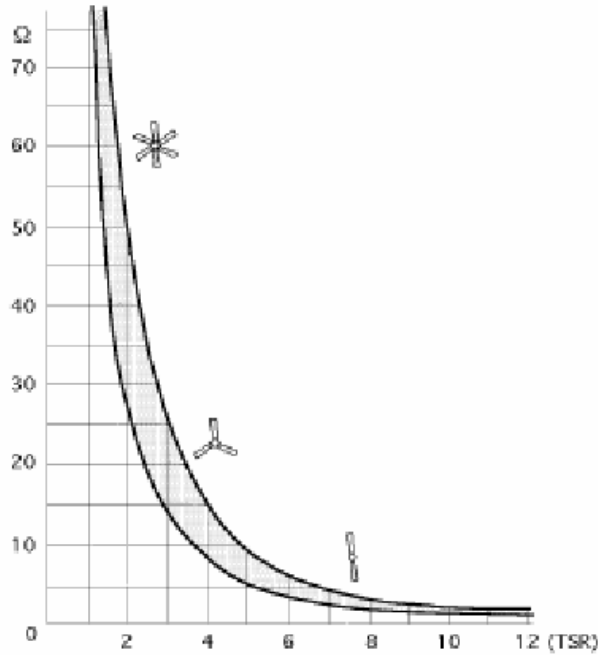


Figura 4. Relación entre el coeficiente de solidez y el TSR

Con el coeficiente de solidez, se calcula la longitud de cuerda media de acuerdo a la relación:

$$\Omega = \frac{\bar{c}Z}{\pi R} \quad (2)$$

R=Radio de la hélice.

Z= Número de hélices (El número de hélices por lo general se recomienda que sea de 3).

Con el valor de cuerda media se puede calcular el valor de cuerda de punta de pala  $C_{pp}$  y el de cuerda raíz  $C_{raíz}$ . Esto se calcula utilizando una variación lineal mediante:

$$C_{pp} = \bar{c} - 0.025l \quad (3)$$

$$C_{raíz} = \bar{c} + 0.025l \quad (4)$$

Donde l es la longitud útil de la pala (0.86R).

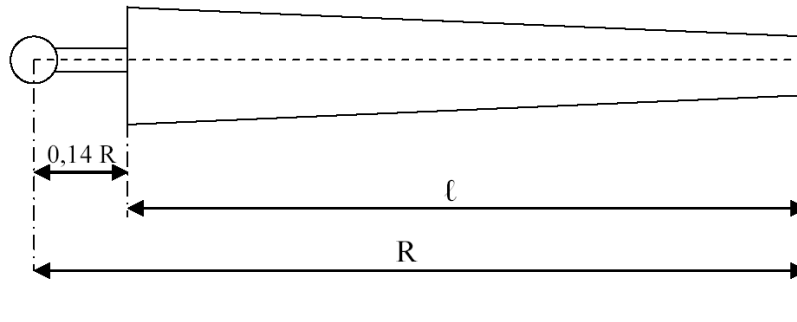


Figura 5. Longitud útil de la hélice.

### E.3 Perfiles alares NACA

Gran parte del trabajo de tabulación de características aerodinámicas de perfiles ha sido desarrollado por el National Advisory Committee of Aeronautics (NACA), la cual es antecesora de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

La nomenclatura de los perfiles NACA es:

#### NACA-Cuatro cifras

La primera cifra indica la máxima flecha de la línea media en % de la cuerda, la segunda cifra indica la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media y las dos últimas cifras el espesor máximo en % de la cuerda (espesor relativo). Por ejemplo, el perfil NACA2415, es un perfil que tiene un 2% de altura máxima de la línea media, situado si 40% del borde de ataque y con un espesor relativo del 15%.

La línea media (curvatura) del perfil está dada por dos parábolas tangentes en el punto de máxima línea media.

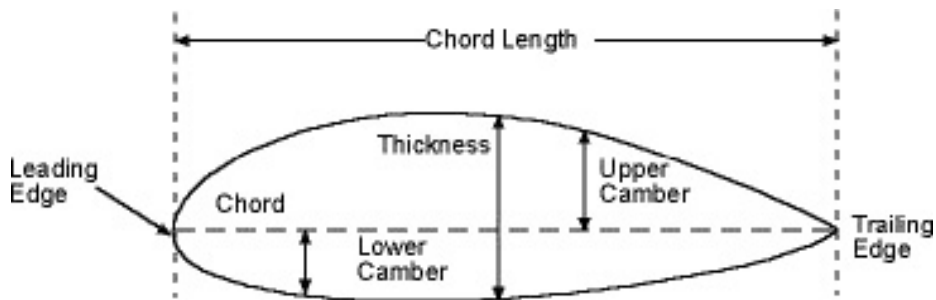


Figura 6. Perfil NACA 4 Series

### **NACA-Cinco cifras**

La primera cifra indica el valor del coeficiente de sustentación ideal de la curvatura del perfil multiplicado por 20 y dividido por 3. Las dos siguientes indican el doble de la posición de la máxima flecha de la línea media (curvatura) en % de la cuerda. Las dos últimas el espesor igual que en el caso del perfil NACA-cuatro cifras.

El espesor es el mismo que para el perfil NACA-Cuatro cifras.

La curvatura se obtiene mediante una parábola cubica empalmada a una línea recta que llega hasta el borde de salida.

### **Modificaciones NACA-Cuatro cifras y NACA-Cinco cifras**

Se añaden dos cifras más a la nomenclatura básica de cuatro o cinco cifras cuyo significado es el siguiente La primera indica el radio de curvatura de la distribución de espesores en el borde de ataque, con una escala entre 0 y 8, tal que el número 6 indica el perfil no modificado. El segundo dígito la posición del máximo espesor en décimas de la cuerda, de tal forma, que ya no está localizado en el 30%.

### **Otros perfiles NACA**

Existen otras tabulaciones realizadas por NACA (NACA-1 o NACA-6) en las que la distribución de espesores aparece en forma tabulada y la línea media del perfil (curvatura) del perfil da una distribución especial de coeficiente local de sustentación.

### **E.4. Control Numérico Computarizado**

El control numérico (CN) es un sistema de automatización de máquinas herramienta que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, en comparación con el mando manual mediante volantes o palancas.

Las primeras máquinas de control numérico se construyeron en los años 1940 y 1950, basadas en las máquinas existentes con motores modificados cuyos mandos se accionaban automáticamente siguiendo las instrucciones dadas en un sistema de tarjeta perforada. Estos servomecanismos iniciales se desarrollaron rápidamente con equipos analógicos y

digitales. El abaratamiento y miniaturización de los microprocesadores ha generalizado la electrónica digital en las máquinas herramienta, lo que dio lugar a la denominación control numérico por computadora, control numérico por computador o control numérico computarizado (CNC), para diferenciarlas de las máquinas que no tenían computadora. En la actualidad se usa el término control numérico para referirse a este tipo de sistemas, con o sin computadora.

Este sistema ha revolucionado la industria debido al abaratamiento de microprocesadores y a la simplificación de la programación de las máquinas de CN.

Para mecanizar una pieza se usa un sistema de coordenadas que especificarán el movimiento de la herramienta de corte.

El sistema se basa en el control de los movimientos de la herramienta de trabajo con relación a los ejes de coordenadas de la máquina, usando un programa informático ejecutado por un ordenador.

En el caso de un torno, hace falta controlar los movimientos de la herramienta en dos ejes de coordenadas: el eje de las X para los desplazamientos laterales del carro y el eje de las Z para los desplazamientos transversales de la torre.

En el caso de las fresadoras se controlan los desplazamientos verticales, que corresponden al eje Z. Para ello se incorporan servomotores en los mecanismos de desplazamiento del carro y la torreta, en el caso de los tornos, y en la mesa en el caso de la fresadora; dependiendo de la capacidad de la máquina, esto puede no ser limitado únicamente a tres ejes.

### **Aplicaciones**

Aparte de aplicarse en las máquinas-herramienta para modelar metales, el CNC se usa en la fabricación de muchos otros productos de ebanistería, carpintería, etc. La aplicación de sistemas de CNC en las máquinas-herramienta han hecho aumentar enormemente la producción, al tiempo que ha hecho posible efectuar operaciones de conformado que era difícil de hacer con máquinas convencionales, por ejemplo la realización de superficies esféricas manteniendo un elevado grado de precisión dimensional. Finalmente, el uso de

CNC incide favorablemente en los costos de producción al propiciar la baja de costes de fabricación de muchas máquinas, manteniendo o mejorando su calidad.

### **Programación en el control numérico**

Se pueden utilizar dos métodos, la programación manual y la programación automática. ..

#### **Programación manual**

En este caso, el programa pieza se escribe únicamente por medio de razonamientos y cálculos que realiza un operario. El programa de mecanizado comprende todo el conjunto de datos que el control necesita para la mecanización de la pieza.

Al conjunto de informaciones que corresponde a una misma fase del mecanizado se le denomina bloque o secuencia, que se numeran para facilitar su búsqueda. Este conjunto de informaciones es interpretado por el intérprete de órdenes. Una secuencia o bloque de programa debe contener todas las funciones geométricas, funciones máquina y funciones tecnológicas del mecanizado. De tal modo, un bloque de programa consta de varias instrucciones.

El comienzo del control numérico ha estado caracterizado por un desarrollo anárquico de los códigos de programación. Cada constructor utilizaba el suyo particular. Posteriormente, se vio la necesidad de normalizar los códigos de programación como condición indispensable para que un mismo programa pudiera servir para diversas máquinas con tal de que fuesen del mismo tipo. Los caracteres más usados comúnmente, regidos bajo la norma DIN 66024 y 66025.

#### **Programación automática**

En este caso, los cálculos los realiza un computador, a partir de datos suministrados por el programador dando como resultado el programa de la pieza en un lenguaje de intercambio llamado APT que posteriormente será traducido mediante un post-procesador al lenguaje máquina adecuado para cada control. Por esta razón recibe el nombre de CAM (Computer Aided Machining o Mecanizado Asistido por Computadora).

### **E.4.1 Máquinas CNC**

Las máquinas con sistemas CNC, son aquellas que en lugar de operaciones manuales para su funcionamiento, requieren de un bloque de códigos que utilizan letras y números para ejecutar los movimientos necesarios para cumplir con el objetivo.

#### **E.4.1.1 Fresadora CNC**

Las máquinas CNC Fresadoras usan un cortador rotatorio para el movimiento de corte y un movimiento lineal para la alimentación. El material es empujado en el cortador, o el cortador es empujado al material, en caminos rectos o curvos tridimensionales, para producir los elementos deseados de una pieza. La pieza terminada es creada mediante la remoción de todo el material innecesario desde la pieza de trabajo. Este proceso se denomina fresado.

#### **E.5 Códigos CNC**

Si bien existe un estándar para este lenguaje, que en realidad apunta a las máquinas industriales, los programas que generan estos códigos pueden ser muy variados, según el tipo de trabajo que se desee realizar, por ejemplo, una perforadora necesita un programa que genere códigos de perforación, una fresadora, requiere otro que genere los códigos de desgaste, una graficadora requiere un programa que genere las coordenadas de trazado del gráfico, etc.

Estos códigos son órdenes que controlan algunos parámetros en el funcionamiento de una máquina, como: sentido de giro, avance, cambio de herramienta, etc.

Comando	Descripción
N	Número de Secuencia
G	Funciones Preparatorias
X	Comando para el Eje X
Y	Comando para el Eje Y
Z	Comando para el Eje Z
R	Radio desde el Centro Especificado
A	Ángulo contra los Punteros del Reloj desde el Vector +X
I	Desplazamiento del Centro del Arco del Eje X
J	Desplazamiento del Centro del Arco del Eje Y
K	Desplazamiento del Centro del Arco del Eje Z
F	Tasa de Alimentación
S	Velocidad de Giro
T	Número de Herramienta
M	Funciones Misceláneas

Tabla 2. Principales códigos CNC.

## E.6 Diseño Asistido por Computadora (CAD)

El diseño asistido por computadora, más conocido por sus siglas inglesas *CAD* (*computer-aided design*), es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades. El CAD es también utilizado en el marco de procesos de administración del ciclo de vida de productos.

También se puede llegar a encontrar denotado con las siglas *CADD* (*computer-aided design and drafting*), que significan «dibujo y diseño asistido por computadora».

Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo en dos dimensiones (2D) y modeladores en tres dimensiones (3D). Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos.

El usuario puede asociar a cada entidad una serie de propiedades como color, usuario, capa, estilo de línea, nombre, definición geométrica, etc., que permiten manejar la información de



forma lógica. Además pueden asociarse a las entidades o conjuntos de éstas otro tipo de propiedades como material, etc., que permiten enlazar el CAD a los sistemas de gestión y producción.

De los modelos pueden obtenerse planos con cotas y anotaciones para generar la documentación técnica específica de cada proyecto. Los modeladores en 3D pueden, además, producir previsualizaciones fotorrealistas del producto, aunque a menudo se prefiere exportar los modelos a programas especializados en visualización y animación.

### **E.7 Manufactura Asistida por Computadora (CAM)**

La fabricación asistida por computadora (en Hispanoamérica) o fabricación asistida por ordenador (en España), también conocida por las siglas en inglés CAM (*computer-aided manufacturing*), implica el uso de computadores y tecnología de cómputo para ayudar en todas las fases de la manufactura de un producto, incluyendo la planificación del proceso y la producción, mecanizado, calendarización, administración y control de calidad, con una intervención del operario mínima.

Debido a sus ventajas, se suele combinar el diseño y la fabricación asistidos por computadora en los sistemas CAD/CAM. Esta combinación permite la transferencia de información desde la etapa de diseño a la etapa de planificación para la fabricación de un producto, sin necesidad de volver a capturar manualmente los datos geométricos de la pieza. La base de datos que se desarrolla durante el CAD es procesada por el CAM, para obtener los datos y las instrucciones necesarias para operar y controlar la maquinaria de producción, el equipo de manejo de material y las pruebas e inspecciones automatizadas para establecer la calidad del producto.

Una función de CAD/CAM importante en operaciones de mecanizado es la posibilidad de describir la trayectoria de la herramienta para diversas operaciones, como por ejemplo torneado, fresado y taladrado con control numérico. Las instrucciones o programas se generan en computadora, y pueden modificar el programador para optimizar la trayectoria de las herramientas. El ingeniero o el técnico pueden entonces mostrar y comprobar visualmente si la trayectoria tiene posibles colisiones con prensas, soportes u otros objetos.

En cualquier momento es posible modificar la trayectoria de la herramienta para tener en cuenta otras formas de piezas que se vayan a mecanizar. También, los sistemas CAD/CAM son capaces de codificar y clasificar las piezas que tengan formas semejantes en grupos, mediante codificación alfanumérica.

Algunos ejemplos de CAM son: el fresado programado por control numérico, la realización de agujeros en circuitos automáticamente por un robot, y la soldadura automática de componentes SMD en una planta de montaje.

### **E.8 Mecánica de Fluidos Computacional (CFD)**

La mecánica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que reduce la velocidad de cálculo como así también el margen de error al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala.

El método consiste en discretizar una región del espacio creando lo que se conoce por una malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad, se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño.

## F.- METODOLOGÍA

### F.1 Matriz de consistencia general

<p>PROBLEMA GENERAL DE INVESTIGACIÓN:</p> <p><b>No existe un proceso metodológico en cuanto al diseño o construcción de palas para aerogeneradores que permitan aprovechar los recursos eólicos de la ciudad de Loja.</b></p>			
TEMA	OBJETO DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL
<p>METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PALAS DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL DE RADIO MÁXIMO 80cm BASADOS EN PERFILES ALARES NACA, APLICANDO TECNOLOGÍA CAD-CAM-CNC</p>	<p>METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PALAS PARA TURBINA EÓLICA DE EJE HORIZONTAL</p>	<p>Con el perfil tipo NACA 4415 de la serie con 4 dígitos, elaborar una metodología de diseño y construcción utilizando tecnología CAD-CAM-CNC aplicada al dimensionamiento de palas de turbinas eólicas con eje horizontal de radio máximo 80cm.</p>	<p>El modelo cumplirá con los requerimientos de una pala para turbinas eólicas de eje horizontal.</p>

## **F.2 Materiales**

En la etapa de construcción se utilizara:

- Flexómetro
- Calibrador
- Fresadora Universal CNC Travis M5 con control FAGOR 8055
- Bloques de material acrílico
- Fresas

## **F.3 Métodos:**

En la etapa de diseño se utilizara el siguiente software:

- SolidWorks
  - AutoCAD
  - SolidCAM
  - SwansoftCNC
  - MathCAD
  - Excel
  - Mecánica del Fluidos Computacional (CFD)
- 
- Deductivo: Con la información obtenida en cuanto a perfiles de NACA de la serie con 4 dígitos, se obtendrá los puntos de la curva característica tanto de la superficie superior como inferior del perfil alar, mediante Microsoft office Excel.
  - Analítico: Con los puntos obtenidos, y con las curvas en sí del perfil, se procederá a plasmar el diseño utilizando un software CAD. Seguidamente los parámetros de este diseño serán trasladados a un software CAM. Finalmente se trabajara en las rutinas y subrutinas del código numérico que será ingresado en la Fresadora para el mecanizado de las palas.
  - Analítico: Se probará el modelo en una plataforma de Dinámica de Fluido computacional, analizando los datos obtenidos.

## G.-CRONOGRAMA

N°	ACTIVIDAD O TAREA	1° MES	2° MES	3° MES	4° MES	5° MES	6° MES	7° MES	8° MES	9° MES	10° MES	11° MES	12° MES
1	Revisión de literatura referente a turbinas eólicas, perfiles alares NACA, Software CAD, CAM, CNC.												
2	Crear una curva de un perfil alar tipo NACA de la serie con 4 dígitos.												
3	Elaborar la metodología de diseño de las palas utilizando software CAD.												
4	Trasladar el diseño en CAD a una plataforma CAM.												
5	Preparación de las rutinas y subrutinas que componen el programa de códigos CNC para la fresadora.												
6	Simulación del programa CNC												
7	Trasladar la programación CNC a												

	la memoria de la Máquina.												
8	Ejecutar la programación en la máquina para la construcción del modelo.												
9	Pruebas de comportamiento en CFD.												
10	Análisis de datos obtenidos en CFD.												

## H.- PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO

N°	Actividad o tarea	Presupuesto	Financiamiento
1	Revisión de literatura referente a turbinas eólicas, perfiles alares NACA, Software CAD, CAM, CNC.	\$20	Propio
2	Elaborar la metodología de diseño de las palas utilizando software CAD.	\$30	Propio
3	Trasladar el diseño en CAD a una plataforma CAM.	\$30	Propio
4	Preparación de las rutinas y subrutinas que componen el programa de códigos CNC para la fresadora.	\$10	Propio
5	Simulación del programa CNC	\$10	Propio
6	Trasladar la programación CNC a la memoria de la Máquina.	\$10	Propio
7	Ejecutar la programación en la máquina para la construcción del modelo.	\$200	Propio
5	Pruebas de comportamiento en CFD.	\$40	Propio
9	Análisis de datos obtenidos en CFD.	-	Propio
TOTAL		\$350	

## **I.- BIBLIOGRAFÍA**

1. **Sánchez, T. y S., Ramírez.** *Desarrollo de microgeneradores eólicos.* Lima-Peru : s.n.
2. **Manuel Rubio, Aitor Domínguez, Alvaro León, Agustín Marcos, Alfonso Arbeteta, Emilio Lechosa.** *Diseño de aerogeneradores.*
3. **Cunty, Guy.** *Aeromotores y aerogeneradores: Guía de la energía eólica.* 1981. 8485725042,9788485725045.
4. **Villarubia, Miguel.** *Energías Alternativas y Medio Ambiente.* Barcelona : Grafos, 2004. 84-329-1062-7.
5. **López, J. M. Escudero.** *Manual de Energía Eólica.* Madrid : Mundi-Prensa, 2008. 978-84-8476-363-3.



## J. ANEXOS

### J.1 MATRIZ DE CONSISTENCIA ESPECÍFICA

PROBLEMA ESPECÍFICO 1: No se dispone de bibliografía correctamente sistematizada y organizada referente a los temas necesarios para desarrollar este proyecto.			
OBJETIVO	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	HIPÓTESIS	SISTEMA CATEGORIAL
Sistematizar la información sobre la aplicación de perfiles tipo NACA	Bibliografía Perfiles NACA	Se logrará graficar el perfil alar NACA de la serie con 4 dígitos.	Perfiles NACA Manual Excel

PROBLEMA ESPECÍFICO 2: No se dispone del diseño de palas para turbina eólica basado en perfiles NACA, en una plataforma CAD.			
OBJETIVO	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	HIPÓTESIS	SISTEMA CATEGORIAL
Diseñar una pala para turbinas eólicas de eje horizontal, utilizando el perfil tipo NACA 4415, bajo criterios de diseño asistido por computadora (CAD).	Tecnologías para el diseño de palas para turbina eólica.	El diseño finalizado en CAD, conservara el perfil transversal referente al diseño de perfil NACA.	Manual SolidWorks Manual AutoCAD

PROBLEMA ESPECÍFICO 3: Se carece de la programación de control numérico, necesaria para la mecanización de las palas.			
OBJETIVO	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	HIPÓTESIS	SISTEMA CATEGORIAL
Elaborar un algoritmo metodológico para la construcción de la pala mencionada, mediante tecnología CAM-CNC.	Algoritmo para la construcción de palas para turbina eólica.	La programación obtenida podrá ser simulada sin inconvenientes en el programa CNC.	Manual SwansoftCNC

PROBLEMA ESPECÍFICO 4: No existe una metodología para la construcción de las palas de turbina eólica, utilizando la fresadora CNC.			
OBJETIVO	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	HIPÓTESIS	SISTEMA CATEGORIAL
Aplicar una prueba de interacción del modelo con el aire, utilizando software de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) y construir el modelo.	Metodología constructiva de palas para turbina eólica en fresadoras CNC.	Los resultados de la interacción del modelo en CFD serán satisfactorias	Evaluación del comportamiento del modelo en un entorno virtual.

## J.2 MATRIZ DE OPERATIVIDAD DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

OBJETIVO ESPECÍFICO 1: Sistematizar la información sobre la aplicación de perfiles tipo NACA						
ACTIVIDAD O TAREA	METODOLOGÍA	FECHA		RESPONSABLES	PRESUPUESTO	RESULTADOS ESPERADOS
		INICIO	FINAL			
Revisión de literatura referente a perfiles alares NACA, Software CAD, CAM, CNC.	Recurrir a bibliotecas, sitios web, revistas y otros documentos que contengan información, concerniente al sistema categorial.	1 Octubre 2012	15 Noviembre 2012	Raúl Chávez	\$20	Marco contextual de los diferentes factores para crear una pala para turbina eólica.
Crear una curva de un perfil alar tipo NACA de la serie con 4 dígitos.	Utilizando una hoja de cálculo de Microsoft Excel, se obtendrá los puntos y la curva del perfil alar propuesto.	16 Noviembre 2012	15 Diciembre 2012	Raúl Chávez	\$30	Modelo de un perfil alar NACA de la serie con 4 dígitos en Microsoft Excel.

OBJETIVO ESPECÍFICO 2: Diseñar una pala para turbinas eólicas de eje horizontal, utilizando el perfil tipo NACA 4415, bajo criterios de diseño asistido por computadora (CAD).

ACTIVIDAD O TAREA	METODOLOGÍA	FECHA		RESPONSABLES	PRESUPUESTO	RESULTADOS ESPERADOS
		INICIO	FINAL			
Elaborar la metodología de diseño de las palas utilizando software CAD.	Con los conocimientos del software CAD diseñar el modelo en formato digital.	16 Diciembre 2012	15 Febrero 2013	Raúl Chávez	\$30	Modelo en CAD bastante fiel al perfil original.

OBJETIVO ESPECÍFICO 3: Elaborar un algoritmo metodológico para la construcción de la pala mencionada, mediante tecnología CAM-CNC.

ACTIVIDAD O TAREA	METODOLOGÍA	FECHA		RESPONSABLES	PRESUPUESTO	RESULTADOS ESPERADOS
		INICIO	FINAL			
Trasladar el diseño en CAD a una plataforma CAM.	Con los conocimientos de manejo de software CAM, importar el diseño desde CAD.	16 Febrero 2013	15 Marzo 2013	Raúl Chávez	\$10	Diseño de las palas en CAM con características congruentes al original.
Preparación de las rutinas y subrutinas que componen el programa de códigos CNC para la fresadora.	Analizar los diferentes códigos CNC, seleccionar los que tienen relación al trazado del perfil geométrico del álabe.  Crear la programación con rutinas y subrutinas, utilizando los códigos CNC.	16 Marzo 2013	15 Abril 2013	Raúl Chávez	\$10	Programación en CNC capaz de realizar los avances y movimientos para plasmar el diseño.
Simulación del programa CNC	Cargar la programación en el simulador y ejecutarlo.	16 Abril 2013	15 Mayo 2013	Raúl Chávez	\$10	Programación CNC cargada y probada en el simulador.

OBJETIVO ESPECÍFICO 4: Aplicar una prueba de interacción del modelo con el aire, utilizando software de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) y construir el modelo.

ACTIVIDAD O TAREA	METODOLOGÍA	FECHA		RESPONSABLES	PRESUPUESTO	RESULTADOS ESPERADOS
		INICIO	FINAL			
Ejecutar la programación en la máquina para la construcción del modelo.	Con el conocimiento del manejo de la Fresadora, mecanizar las palas.	16 Mayo 2013	15 A Junio 2013	Raúl Chávez	\$100	Modelo de las palas en material acrílico.
Trasladar el modelo de la pala a una plataforma CFD.	En base a los conocimientos de pruebas de rendimiento de turbinas eólicas, analizar el desempeño del modelo.	16 Julio 2013	15 Agosto 2013	Raúl Chávez	-	Modelo en CFD.
Análisis de datos de pruebas de comportamiento en CFD.	Con los datos obtenidos de las pruebas, comparar estos con el rendimiento de un modelo convencional de turbina.	16 Agosto 2013	15 Septiembre 2013	Raúl Chávez	\$20	Datos de pruebas de comportamiento.
Ejecutar la programación en la máquina para la construcción del modelo.	Con el conocimiento del manejo de la Fresadora, mecanizar las palas.	16 Septiembre 2013	1 Octubre 2013	Raúl Chávez	\$100	Modelo de las palas en material acrílico.

### J.3 MATRIZ DE CONTROL DE RESULTADOS

N°	RESULTADO ESPERADO	FECHA DE ENTREGA	FIRMA TUTOR
1	Marco contextual de los diferentes factores para crear una pala para turbina eólica.	16 Noviembre 2012	
2	Modelo de un perfil alar NACA de la serie con 4 dígitos en Microsoft Excel.	16 Diciembre 2012	
3	Modelo en CAD bastante fiel al perfil original.	16 Febrero 2013	
4	Diseño de las palas en CAM con características congruentes al original.	16 Marzo 2013	
5	Programación en CNC capaz de realizar los avances y movimientos para plasmar el diseño.	16 Abril 2013	
6	Programación CNC cargada y probada en el simulador.	16 Junio 2013	
7	Programación CNC cargada y probada en la Fresadora CNC.	16 Julio 2013	
8	Modelo en CFD.	15 Agosto 2013	
9	Datos de pruebas de comportamiento.	15 Septiembre 2013	
10	Modelo de las palas en material acrílico.	30 Septiembre 2013	