DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR DE UNA TOBERA DE EMPUJE VECTORIAL

MARÍA ALEJANDRA ALVARADO FLÓREZ
DAVID ORLANDO CASTILLO TIBOCHA
NICOLÁS ALBERTO PATIÑO CRUZ

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.
2005

DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR DE UNA TOBERA DE EMPUJE VECTORIAL

MARÍA ALEJANDRA ALVARADO FLÓREZ
DAVID ORLANDO CASTILLO TIBOCHA
NICOLÁS ALBERTO PATIÑO CRUZ

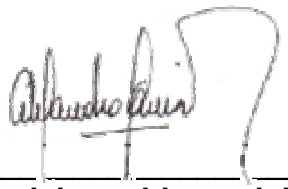
Proyecto de Grado

Ing. Magister Fernando Colmenares

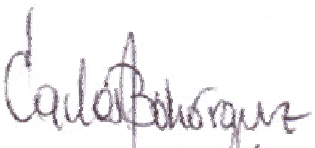
UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.
2005

Nota de Aceptación:

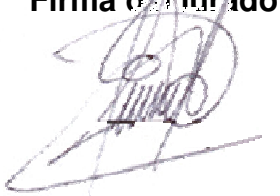
_____
_____
_____
_____
_____
_____



_____
Firma del presidente del jurado



_____
Firma del jurado



_____
Firma del jurado

Bogotá D.C., , 01, 2006.

Dedicatoria

A Dios y a mi familia que desde el comienzo de mi existir siempre han estado al lado, creyendo en cada una de mis capacidades y fortalezas tanto personales como profesionales y a todas aquellas personas que me brindaron su apoyo incondicional en el transcurso de mi carrera en especial a mis grandes amigos Cristian, Fernando, Paula, Jhonny, Nicolás y Sergio.

María Alejandra Alvarado Flórez

Dedicatoria

Este proyecto esta dedicado a todas las personas que de alguna u otra forma nos ayudaron por medio de sus ideas y aportes que permitieron la ejecución de este proyecto. Además, a todas las personas que nos facilitaron los medios necesarios para la ejecución de nuestro proyecto.

A mi familia, que gracias a ellos recibí el apoyo en todo momento y quienes además me brindaron todos los medios que estaban al alcance de ellos de forma incondicional, que de lo contrario no hubiera sido posible sin la ayuda de ellos.

A mis amigos del pueblo, quienes me apoyaron recibiendo de ellos animo en los momentos difíciles.

A mis compañeros de clase, quienes aportaron con sus conocimientos e ideas al desarrollo del proyecto de grado.

A Dios quien me dio la fe y salud para poder llevar a cabo este proyecto.

Nicolás Alberto Patiño Cruz

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a todas aquellas personas que con su aporte contribuyeron para que esta investigación fuera llevada a cabo.

A Dios, por darnos sabiduría, fe y esperanza de que todo lo que se sueña, con fervor, trabajo y esfuerzo se puede conseguir tarde o temprano.

A mi familia, porque su apoyo incondicional fue el soporte para completar satisfactoriamente y a conciencia el desarrollo del trabajo.

A mis amigos de verdad, porque con el granito de arena aportado contribuyeron en gran medida a construir los resultados.

Al personal de la coordinación de sistemas, que tuvieron la mejor disponibilidad y paciencia para colaborar con los requerimientos que fueron necesitados.

A todos los demás ajenos aquí pero que el conocimiento de algo permitió resolver cualquier duda.

Gracias, de todo corazón.

David Orlando Castillo Tibocha

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero MSc. Fernando Colmenares quien ha sido guía permanente en el proyecto de grado, aportándo sus conocimientos referidos a este tema para que la investigación fuera la más profunda y acertada. Le agradecemos el tiempo y la dedicación puesta, para que este proyecto se realizara satisfactoriamente.

Al Ing. Arnold Escobar quien fue el tutor encargado, ayudó en la etapa final del proyecto, en donde fue de gran importancia los aportes realizados a nuestra investigación.

Al Ing. Carlos Bohórquez quien ayudó en la parte concerniente a la selección de materiales de la tobera.

Al Ing. Oscar Grandas quien aportó sus ideas para desarrollar el análisis de la tobera por medio del programa CFD y además quien colaboró muy amablemente con el análisis del sistema de actuación y mecanismos.

Al Ing. David F Muñoz quien colaboró en el diseño conceptual del sistema hidráulico.

Al Ing. Aurelio Méndez quien dio las pautas para la elaboración y desarrollo del proyecto de grado, además colaboró con los aportes conceptuales para nuestro proyecto.

A la asesora metodológica Amanda Moya, quien siempre estuvo dispuesta para aclarar todas las dudas metodológicas, ayudó a redactar y organizar adecuadamente las diferentes partes del proyecto.

Al personal de coordinación de informática la colaboración y disponibilidad para con el proyecto, permitiendo desarrollar el análisis computacional más fácilmente.

A todos ustedes gracias por su colaboración y aportes para el cumplimiento satisfactorio de nuestro objetivo.

RESUMEN

Este proyecto sirvió para analizar la importancia del estudio de los diferentes parámetros de las toberas de empuje vectorial. Por medio de una metodología que permitió estudiar los aspectos básicos de funcionamiento y de operación de la misma, se pudieron determinar las ventajas y desventajas de los casos ideales de vectorización de una tobera que pudiera funcionar en ambos regimenes.

La investigación se desarrolló metódicamente y se analizaron los puntos críticos durante el diseño preliminar, teniendo en cuenta lo que se necesita y el objeto de estudio del proyecto. Partiendo de esto, es a través de la investigación que se propuso y trabajó una idea, para que fuese evaluada.

La característica principal de este diseño fue determinar las condiciones necesarias para desarrollar un método de vectorización, el estudio de los cambios de operación debidos al comportamiento del flujo, define que condiciones son necesarias y cual es el diseño optimo que permite redirigir el flujo de una forma estable obteniendo los valores máximos de rendimiento.

Este proyecto mostró la disposición y la metodología para realizar el análisis de diseño del componente, explicó los temas de mayor relevancia para el estudio y su respectivo desarrollo conceptual.

Como herramientas auxiliares de interpretación, las gráficas proporcionaron una herramienta adecuada para que el estudio fuera de más fácil entendimiento, también se utilizaron como medo para comprender de una mejor forma cual es el comportamiento del objeto de análisis, y en base a esto, se propusieron variaciones, enfoques de estudio más adecuados, cambios en la geometría o en los parámetros de funcionamiento.

Para este tipo de diseños de componentes de aviación, fue importante que los análisis térmicos, estructurales, del mecanismo, de actuación, de influencias externas e internas sobre el componente, así como el análisis preliminar de los costos fueran incluidos como las partes más importantes durante el desarrollo del proyecto; en función de esto, y del grado de profundidad en que se realizó esta investigación, se obtuvieron los resultados más óptimos que son los que definieron la selección del componente adecuado para cumplir con lo que se requiere.

GLOSARIO

COHESIÓN: Es la resistencia que oponen las moléculas de los materiales a separarse unas de otras.

DUREZA: Es la resistencia que opone un cuerpo de recobrar su forma primitiva cuando cesa la causa que lo deforma. Los materiales poseen un límite de elasticidad, a partir del cual las deformaciones producidas son permanentes.

DUCTILIDAD: Es la capacidad que poseen ciertos materiales de poder deformarse plásticamente y extenderse en forma de hilos cuando son sometidos a esfuerzos de tracción. Los materiales dúctiles más típicos son el cobre, el aluminio, el oro y el volframio.

FATIGA: Es la resistencia a la rotura por un esfuerzo de magnitud o sentido variables.

FLUJO UNIFORME: Se define flujo uniforme cuando las propiedades de un fluido no cambian con el tiempo en ningún punto de un volumen de control, el volumen de control es un volumen predefinido que esta contenido en una superficie de control, por donde pasa cualquier cantidad de materia y que tiene la posibilidad de interactuar con el medio en que este trabajando.

FLUJO UNIDIMENSIONAL: Se define como flujo unidimensional, como aquel fluido dentro de una superficie de control, el cual tiene propiedades y características uniformes, el cual mantiene una dirección de la misma manera constante.

FRAGILIDAD: Es la cualidad contraria a la tenacidad. El diamante y el vidrio ordinario son materiales frágiles.

MALEABILIDAD: Es la capacidad de algunos materiales de poder deformarse plásticamente y extenderse en forma de láminas cuando son sometidas a esfuerzos de compresión.

PLASTICIDAD: Es la capacidad que tienen algunos materiales sólidos de adquirir deformaciones permanentes sin llegar a la rotura.

RESILIENCIA: Es la capacidad de un material de absorber energía en la zona elástica al someterlo a un esfuerzo de rotura.

SERVO-VÁLVULAS: Son válvulas que se emplean en general en pequeños y singulares motores o accionamientos que originan un par de giro que permite el desplazamiento de una corredera mediante una varilla elástica solidaria al núcleo.

TENACIDAD: Es la capacidad de absorber energía frente a esfuerzos bruscos exteriores antes de romperse o deformarse. Un material es tenaz cuando resulta ser elástico y plástico a la vez.

VÁLVULAS PROPORCIONALES: Son válvulas que utilizan bobinas electromagnéticas en las cuales la fuerza que actúa sobre la corredera es proporcional a la intensidad de corriente o a la tensión que circula por ellas. Existen válvulas reguladoras de caudal y válvulas reguladoras de presión.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	33
1. PROBLEMA	34
1.1 TÍTULO	34
1.2 TEMA	34
1.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	34
1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	34
1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	35
2. JUSTIFICACIÓN	36
3. OBJETIVOS	37
3.1 OBJETIVO GENERAL	37
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37

4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA 38

4.1 ALCANCE 38

4.2 LIMITACIONES 38

5. RECURSOS 40

5.1 RECURSOS HUMANOS 40

5.2 RECURSOS FINANCIEROS 40

5.3 RECURSOS FÍSICOS 40

6. MARCO TEÓRICO 41

6.1 RESEÑA HISTÓRICA 41

6.2 ANTECEDENTES 41

6.3 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS TOBERAS 41

7. DESARROLLO METODOLOGICO 43

7.1 DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR 44

7.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA 45

8. DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR DE UNA TOBERA 50

8.1 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS INICIALES PARA FLUJO SUPERSÓNICO 50

8.1.1 Definición de las características de funcionamiento de la tobera supersónica 51

8.2 DISEÑÓ INICIAL DE LA TOBERA SUPERSÓNICA 56

8.2.1 Análisis en la entrada en la tobera 56

8.2.2 Análisis en la garganta de la tobera 62

8.2.3 Análisis en la salida de la tobera 66

8.2.4 Ángulos principales de la tobera 70

8.2.5 Cálculo del empuje ideal de la tobera en régimen supersónico 77

8.2.6 Características Operativas de la Tobera supersónica 78

8.3 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS INICIALES PARA FLUJO SUBSONICO 81

8.3.1. Datos iniciales de entrada para flujo subsónico 81

8.3.2 Análisis a la entrada de la tobera 83

8.3.3 Análisis en la garganta de la tobera. 87

8.3.4 Análisis de la sección de salida 90

8.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA TOBERA 92

8.4.1 Redondeo de las esquinas de la sección transversal de la tobera. 93

8.4.2 Ecuación para redondeo de las esquinas 95

8.4.3 Dimensiones finales 100

8.4.4 Dimensionamiento en régimen subsónico 109

8.5 COMPROBACIÓN DE LOS DATOS 113

8.5.1 Descripción general del software CFD 113

8.5.2 Consideraciones adicionales 116

8.5.3 Comprobación de los datos en condiciones supersónicas 117

8.5.4 Comprobación de los datos en condiciones subsónicas 126

9. MÉTODOS DE VECTORIZACIÓN 132

9.1 MOVIMIENTO INTERNO DE LAS SECCIONES CONVERGENTE Y DIVERGENTE (TIPO 1) 132

9.2 MOVIMIENTO ÚNICO DE LA SECCIÓN DIVERGENTE (TIPO 2) 134

9.3 MOVIMIENTO TOTAL EXTERNO DE LA TOBERA (TIPO 3) 135

9.4 MOVIMIENTO TOTAL EXTERNO DE LA TOBERA DE CAJÓN PIVOTADO EN EL MEDIO (TIPO 4) 136

10. ESTUDIO TEÓRICO TERMOGASODINAMICO DE LOS MÉTODOS DE VECTORIZACIÓN 138

10.1 VECTORIZACIÓN EN RÉGIMEN SUPERSÓNICO 138

10.1.1 Visualización de los diferentes modelos de vectorización para régimen supersónico. 140

10.1.1.1 Vectorización para el modelo tipo 1 140

10.1.1.2 Vectorización para el modelo tipo 2 141

10.1.1.3 Vectorización para el modelo tipo 3 142

10.1.1.4 Vectorización para el modelo tipo 4 142

10.2 VECTORIZACIÓN EN RÉGIMEN SUBSÓNICO 143

10.2.1 Visualización de los diferentes modelos de vectorización para régimen subsónico. 144

10.3 ANÁLISIS DE LOS CASOS DE VECTORIZACIÓN CRÍTICOS 164

10.3.1 Resultados y análisis en régimen supersónico 164

10.3.2 Resultados y análisis en régimen subsónico 170

11. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA TOBERA 178

11.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS 178

11.1.1. Etapas para el cálculo de la estructura 178

11.1.2 Especificar material y propiedades de cada elemento 179

11.1.3 Aplicación de las condiciones de contorno o restricciones de movimientos 181

11.1.4 Introducir sistemas de cargas equivalentes que simulen la puesta en servicio de la estructura 182

11.2. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE ESFUERZOS 183

11.2.1 Criterio de von mises 183

11.2.2 Esfuerzo equivalente de Von mises 188

11.2.3 Esfuerzo equivalente de Von mises por simulación 189

11.2.4 Componentes de la deformación 190

11.2.5 Deformación total 195

11.3 ANÁLISIS BÁSICO TÉRMICO 196

11.4 SELECCIÓN DEL MATERIAL 200

11.4.1 Análisis para diferentes tipos de materiales 201

11.5 ANÁLISIS DE MÉTODO PARA BALANCEO ESTÁTICO DE LA TOBERA 209

12. ANÁLISIS DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO DE LA TOBERA 211

12.1 MOVIMIENTO INTERNO DE LAS SECCIONES CONVERGENTE Y DIVERGENTE (TIPO 1) 212

12.1.1 Ubicación del sistema de actuación 212

12.1.2 Análisis de vectorización 213

12.1.3 Tabla de ángulos β-Θ 217

12.1.4 Interacción entre el mecanismo de la tobera y el sistema de actuación 217

12.2 MOVIMIENTO ÚNICO DE LA SECCIÓN DIVERGENTE (TIPO 2) 217

12.2.1 Ubicación del sistema de actuación 218

12.2.2 Análisis de vectorización 220

12.2.3 Tabla de ángulos β-Θ 220

12.2.4 Interacción entre el mecanismo de la tobera y el sistema de actuación 222

12.3 MOVIMIENTO TOTAL EXTERNO DE LA TOBERA (TIPO 3) 222

12.3.1 Ubicación del sistema de actuación 222

12.3.2 Análisis de vectorización 222

12.3.3 Tabla de ángulos β-Θ 223

12.3.4 Interacción entre el mecanismo de la tobera y el sistema de actuación 226

12.4 MOVIMIENTO TOTAL EXTERNO DE LA TOBERA DE CAJÓN PIVOTADO EN EL MEDIO (TIPO 4) 226

12.4.1 Ubicación del sistema de actuación 227

12.4.2 Análisis de vectorización 228

12.4.3 Tabla de ángulos β-Θ 230

12.4.4 Interacción entre el mecanismo de la tobera y el sistema de actuación 230

12.5 VECTORIZACIÓN DEL SISTEMA RÉGIMEN SUBSÓNICO 232

12.6 ANÁLISIS DEL MECANISMO CON DISPOSITIVO TIPO CAM 232

12.6.1 Determinación de la curvatura 233

12.6.2 Mecanismo con un solo actuador 235

12.6.3 Mecanismo con un solo actuador 235

12.7 ANALISIS DEL MECANISMO CON DISPOSITIVO DE ACTUADOR PIVOTE 237

13. SISTEMA DE ACTUACIÓN 238

13.1 SISTEMA DE CONTROL Y FUNCIONAMIENTO 239

13.2 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE ACTUACIÓN 243

13.2.1 Esquema del circuito hidráulico 243

13.2.2 Selección inicial de los actuadores hidráulicos 247

13.2.3 Cálculo de la fuerza máxima soportada por los actuadores 251

13.2.4 Cálculo del actuador hidráulico 252

13.2.5 Presión mínima de operación del sistema hidráulico 254

13.2.6 Definición de la velocidad de avance o retroceso 260

13.2.7 Comportamiento del fluido hidráulico y caída de presión general en el sistema 266

13.2.8 Sistema de emergencia 279

13.2.9 Sistema en general 281

14. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROTOTIPO 283

15. CONCLUSIONES 285

16. RECOMENDACIONES 292

BIBLIOGRAFIA 293

ANEXOS 295

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A ATMÓSFERA ESTÁNDAR	295
ANEXO B FUNCIONES PARA FLUJO COMPRESIBLE	299
ANEXO C MOTOR F119-PW-100	308
ANEXO D MODELO DEL MOTOR F119-PW-100 CON TOBERA PARA VECTORIZACION BI – DIMENSIONAL	309
ANEXO E GENERALIDADES DE ALGUNAS BOMBAS HIDRÁULICAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO USADAS EN AVIACIÓN	310
ANEXO F ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS GASES	312
ANEXO G DIAGRAMA DE MOODY	315
ANEXO H VISCOSIDADES TÍPICAS DE ALGUNOS FLUIDOS HIDRÁULICOS	316
ANEXO I TIPOS DE FLUIDOS HIDRÁULICOS UTILIZADOS EN AVIACIÓN	317
ANEXO J PROPIEDADES DE ALGUNOS METALES Y MATERIALES RESISTENTES A ALTAS TEMPERATURAS	318

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Esquema de motor con tobera supersónica 50

Figura 2. Esquema de una tobera supersónica 51

Figura 3. Gráfica Parámetro de flujo másico (MFP) vs. Número Mach (M) 59

Figura 4. Ángulos de una tobera supersónica 70

Figura 5. Gráfica ángulo primario de la tobera en función del coeficiente de flujo vs. Grados de inclinación en la parte convergente 72

Figura 6. Gráfica de Coeficiente de velocidad de la tobera 77

Figura 7. Gráfica de las características operativas de la tobera supersónica 80

Figura 8. Esquema de una tobera subsónica 81

Figura 9. Esquema de las dimensiones principales de la tobera 93

Figura 10. Esquema de las dimensiones de la sección transversal de entrada en la tobera 94

Figura 11. Esquema de las dimensiones de la sección transversal mínima de garganta de la tobera 95

Figura 12. Esquema Dimensiones de área de entrada en la tobera (ejemplo) 100

Figura 13. Geometría de la parte convergente ideal de una tobera laval 102

Figura 14. Esquema de las dimensiones de la sección transversal de salida de la tobera 103

Figura 15. Geometría de la parte divergente ideal de una tobera laval 104

Figura 16. Esquema de las dimensiones principales definidas de la tobera en régimen supersónico (ejemplo) 109

Figura 17. Esquema de las dimensiones de una tobera convergente 110

Figura 18. Esquema de las dimensiones principales definidas de la tobera en régimen subsónico (ejemplo) 112

Figura 19. Esquema tobera supersónica suavizada 118

Figura 20. Esquema tobera subsónica suavizada 118

Figura 21. Enmallado característico 3D para análisis supersónico 119

Figura 22. Enmallado característico sección de la tobera para análisis supersónico 120

Figura 23. Gráfica de los residuales de error después de realizar las iteraciones 122

Figura 24. Variación del flujo másico entre la entrada y la salida de la tobera 122

Figura 25. Distribución de la presión estática régimen supersónico 123

Figura 26. Distribución de la velocidad (Número de Mach) en régimen supersónico 124

Figura 27. Enmallado característico 3D para análisis subsónico 125

Figura 28. Enmallado característico sección de la tobera para análisis subsónico 126

Figura 29. Gráfica de los residuales de error después de realizar los cálculos respectivos 127

Figura 30. Variación del flujo másico entre la entrada y la salida de la tobera 128

Figura 31. Distribución de la presión estática régimen subsónico 129

Figura 32. Distribución de la velocidad (Número de Mach) en régimen subsónico 130

Figura 33. Esquema de vectorización tipo 1, movimiento interno parte convergente-divergente de la tobera 133

Figura 34. Esquema de vectorización tipo 2, movimiento interno parte divergente de la tobera 135

Figura 35. Esquema de vectorización tipo 3, movimiento total externo láminas superior e inferior de la tobera 136

Figura 36. Esquema de vectorización tipo 4, movimiento total externo láminas superior e inferior de la tobera 137

Figura 37. Enmallado lateral característico 2-D para análisis supersónico posicionamiento de los nodos 139

Figura 38. Enmallado superficial característico 2-D para análisis supersónico 139

Figura 39. Enmallado lateral característico 2-D para análisis subsónico posicionamiento de los nodos 143

Figura 40. Enmallado superficial característico 2-D para análisis subsónico 144

Figura 41. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 1 148

Figura 42. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 1 149

Figura 43. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 2 150

Figura 44. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 2 151

Figura 45. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 3 152

Figura 46. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 3 153

Figura 47. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 4 154

Figura 48. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 4 155

Figura 49. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 1 156

Figura 50. Perfil de presión estática 0,5 10, y 15 grados de vectorización subsónico tipo 1 157

Figura 51. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 2 158

Figura 52. Perfil de presión estática 0,5 10, y 15 grados de vectorización subsónico tipo 2 159

Figura 53. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 3 160

Figura 54. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 3 161

Figura 55. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 4 162

Figura 56. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 4 163

Figura 57. Distribución de presión estática sin vectorización (supersónico) 165

Figura 58. Distribución de presión estática tipo 1 y tipo 2 (supersónico) 165

Figura 59. Distribución de presión estática tipo 3 y tipo 4 (supersónico) 166

Figura 60. Distribución de Número de Mach sin vectorización (supersónico) 168

Figura 61. Distribución de Número de Mach tipo 1 y tipo 2 (supersónico) 169

Figura 62. Distribución de Número de Mach tipo 3 y tipo 4 (supersónico) 169

Figura 63. Distribución de Presión Estática sin vectorización (subsónico) 171

Figura 64. Distribución de Presión Estática tipo 1 y tipo 2 (subsónico) 172

Figura 65. Distribución de Presión Estática tipo 3 y tipo 4 (subsónico) 173

Figura 66. Distribución de Número de Mach sin vectorización (subsónico) 174

Figura 67. Distribución de Número de Mach tipo 1 y tipo 2 (subsónico) 174

Figura 68. Distribución de Número de Mach tipo 3 y tipo 4 (subsónico) 176

Figura 69. Esquema del proceso del cálculo con el análisis de métodos finitos 178

Figura 70. Enmallado de la geometría mediante elementos y nodos 179

Figura 71. Enmallado de la pieza y selección del espesor 180

Figura 72. Restricciones 181

Figura 73. Distribución de presiones 182

Figura 74. Perfil de esfuerzos Sigma X, Y, Z respectivamente para la tobera supersónica sin vectorización 184

Figura 75. Perfil del esfuerzo cortante XY, YZ, para la tobera supersónica sin vectorización 185

Figura 76. Nodos de la sección convergente 186

Figura 77. Distribución y ubicación de nodos 188

Figura 78. Esfuerzo equivalente de von mises 190

Figura 79. Perfil de deformación en ejes X, Y, Z respectivamente tobera supersónica sin vectorización 192

Figura 80. Rotación (torsión) en X, Y, Z respectivamente tobera supersónica sin vectorización 193

Figura 81. Perfil de deformación total resultante para la tobera supersónica sin vectorización 195

Figura 82. Temperaturas de operación 197

Figura 83. Deformación por temperatura 198

Figura 84. Flujo de calor en el eje X, Y, Z respectivamente para tobera supersónica sin vectorizar 199

Figura 85. Esfuerzos por temperatura 200

Figura 86. Materiales usados en toberas 201

Figura 87. Características del titanio, acero, cerámico y aleaciones de magnesio 202

Figura 88. Deformaciones por temperatura del titanio, aleación de acero, aleaciones de magnesio y cerámico 203

Figura 89. Esfuerzos por temperatura equivalentes del titanio, aleación de acero, aleación de magnesio y cerámico 204

Figura 90. Esquema de balanceo *"Beam Balance Design"* 209

Figura 91. Esquema 3D de la tobera de mecanismo tipo 1 211

Figura 92. Esquema de los puntos de unión de la lámina con el actuador tipo 1 213

Figura 93. Variación esquemática del perfil de vectorización, mecanismo tipo 1 214

Figura 94. Distribución de los actuadores para el caso tipo 1 216

Figura 95. Esquema 3D de la tobera de mecanismo tipo 2 218

Figura 96. Esquema de los puntos de unión de la lámina con el actuador tipo 2 218

Figura 97. Variación esquemática del perfil de vectorización, mecanismo tipo 2 219

Figura 98. Distribución de los actuadores para el caso tipo 2 221

Figura 99. Esquema de los puntos de unión de la lámina con el actuador tipo 3 223

Figura 100. Variación esquemática del perfil de vectorización, mecanismo tipo 3 224

Figura 101. Distribución de los actuadores para el caso tipo 3 225

Figura 102. Esquema 3D de la tobera de mecanismo tipo 4 226

Figura 103. Esquema 3D de la tobera de mecanismo tipo 4 para diferentes posiciones de vectorización 227

Figura 104. Esquema de los puntos de unión de la lámina con el actuador 228

Figura 105. Variación esquemática del perfil de vectorización, mecanismo tipo 4 229

Figura 106. Distribución de los actuadores para el caso tipo 3 231

Figura 107. Esquema de vectorización para régimen subsónico 232

Figura 108. Conjunto de actuación 234

Figura 109. Descripción del movimiento 234

Figura 110. Mecanismo con un solo actuador 235

Figura 111. Mecanismo con dos actuadores 236

Figura 112. Mecanismo con dos actuadores 236

Figura 113. Interacción básica entre el control de la aeronave y la tobera vectorial 241

Figura 114. Esquema hidráulico de componentes de actuación de la tobera sensores magnéticos sobre lámina dinámica para caso tipo 3 245

Figura 115. Esquema hidráulico de componentes de actuación de la tobera sensores magnéticos sobre sección estática para caso tipo 4 246

Figura 116. Esquema de distribución resultante de fuerzas en vectorización caso tipo 4 con empotramiento 248

Figura 117. Esquema de distribución resultante de fuerzas en vectorización caso tipo 4 con actuador fijo 249

Figura 118. Divisor de caudal para el sistema hidráulico de la tobera 253

Figura 119. Variación de la presión mínima requerida con respecto al diámetro del pistón 256

Figura 120. Esquema del desplazamiento del vástago superior caso tipo 4 258

Figura 121. Esquema del desplazamiento del vástago superior caso tipo 4 con acople estructural 259

Figura 122. Esquema de unión del cilindro y la manguera 269

Figura 123. Esquema de dimensiones ideales del sistema hidráulico 273

Figura 124. Distribución de presiones para cálculo de pérdidas 277

Figura 125. Cilindro hidráulico con retorno en ambos sentidos por resorte 281

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Información general sobre motores utilizados en aviación militar 53

Tabla 2. Variación de la longitud de la parte divergente en función del ángulo secundario de la tobera (β) 106

Tabla 3.Valores máximos txy nodos 14 y 60 187

Tabla 4.Valores máximos tzx nodo 8 y 20 187

Tabla 5.Valores máximos tzx nodos 43 y 57 188

Tabla 6. Valores máximos desplazamiento en X nodos 44 y 59 191

Tabla 7. Valores máximos desplazamiento en Y nodos 34 y 50 194

Tabla 8. Valores máximos desplazamiento en Z nodos 34 y 38 194

Tabla 9. Deformación total máxima nodo 59 195

Tabla 10. Comparación de materiales respecto a deformación 205

Tabla 11. Comparación de materiales respecto a esfuerzos 205

Tabla 12. Comparación de materiales respecto a masa total 206

Tabla 13. Variación de los grados internos de la tobera, según el caso de vectorización tipo 1 régimen supersónico 217

Tabla 14. Variación de los grados internos de la tobera, según el caso de vectorización tipo 2 régimen supersónico 222

Tabla 15. Variación de los grados internos de la tobera, según el caso de vectorización tipo 2 régimen supersónico 223

Tabla 16. Variación de los grados internos de la tobera, según el caso de vectorización tipo 4 régimen supersónico 230

Tabla 17. Variación de la fuerza requerida por el actuador en función del ángulo de vectorización 252

Tabla 18. Generalidades de algunas bombas hidráulicas 253

Tabla 19. Variación de la presión mínima requerida con respecto al diámetro del pistón 256

Tabla 20. Relación de caudales para diferentes diámetros de pistón y de vástago 264

Tabla 21. Número de Reynolds para las diferentes estaciones del sistema hidráulico 274

Tabla 22. Caída de presión de las líneas de hidráulicas 276

Tabla 23. Cálculo de las caídas de presión en el sistema 279

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los desarrollos tecnológicos se han basado en la necesidad de crear componentes cada día más automatizados, que tengan la finalidad de reducir el trabajo realizado por el hombre. Estos componentes se desarrollan en base a grandes y costosos estudios los cuales trabajan una idea para cumplir en requerimiento deseado.

En la Industria Aeronáutica son más y más los esfuerzos que se hacen para aumentar la eficiencia de las aeronaves y sus respectivos componentes. La necesidad de hacer los aviones de combate menos limitados por sus características aerodinámicas y estructurales, ha originado un creciente enfoque en el mejoramiento de sus componentes para hacerlo cada vez más simple en su funcionamiento y efectivo para cualquier tipo de vuelo o misión como sea requerido.

En el amplio estudio de estos componentes, la parte de los motores a reacción ha jugado un papel importante en el mejoramiento de las características de operación de las aeronaves. Dentro de ellos, cada uno de sus componentes han sido estudiados, alterados y modificados una y otra vez para mejorar el rendimiento o cumplir una misión específica. Entre estos mismos, las toberas se han convertido en un objeto de gran importancia como se ha demostrado en los últimos avances tecnológicos del campo aeronáutico, ya que experimentalmente se ha observado que su desarrollo permite generar mejores características de maniobras en los aviones, así como también aumentar la eficiencia del motor.

Las toberas se construyeron inicialmente como el medio por el cual los gases de escape se dirigían al exterior, proceso durante el cual, los mismos eran acelerados para producir el empuje necesario y mover el elemento requerido. En los últimos años, la Industria Aeronáutica y Aeroespacial se ha enfocado en estudiar su influencia en las maniobras de cabeceo del avión, ya que se observó la posibilidad de desarrollar una tobera de posición variable con la cual, la dirección del flujo se podría cambiar y de esta manera, afectar la componente de fuerza que actúa sobre el avión para realizar maniobras más rápidamente.

1. PROBLEMA

1.1 TÍTULO

Diseño metodológico de una tobera de empuje vectorial.

1.2 TEMA

Toberas.

1.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto de investigación corresponde a la línea de construcción y resistencia de motores, según las líneas establecidas por el Programa de Ingeniería Aeronáutica en la Universidad de San Buenaventura.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la poca información que se encuentra en los libros acerca de toberas de empuje vectorial, se pretende con la siguiente investigación realizar un aporte teórico al tema, creando una metodología para el diseño de este nuevo dispositivo y mostrando sus principales características de funcionamiento.

Es necesario que la Industria Aeronáutica del futuro tenga las suficientes bases para comenzar con el desarrollo de proyectos que puedan mejorar el rendimiento de las aeronaves y sus componentes o que permitan crear nuevos modelos para producir nuevas ideas, de esta manera se logra que el mundo aeronáutico sea más eficiente y rentable. Este proyecto se encuentra dirigido hacia el mejoramiento o el aporte de nuevas ideas acerca del diseño y estudio de este tipo de toberas en el campo aeronáutico el cual pueda en un futuro servir como herramienta para la realización de trabajos relacionados con esta temática.

Este proyecto se plantea como un aporte científico en el cual se mostrará el análisis de diferentes tipos de toberas y sus respectivos mecanismos, analizados en un término general para determinar cual de todos es más eficiente. Esta es una herramienta científica que le permitirá a la Universidad tener una base de estudio de un tema específico, en un campo tan grande y complejo como lo es la Ingeniería Aeronáutica.

El estudio identificará cuatro formas posibles de vectorización que partiendo de un análisis termogasodinámico inicial, permitirá evaluar la(s) forma(s) de vectorización del flujo más efectiva(s), partiendo de este planteamiento se debe analizar de la misma manera el comportamiento de la estructura y las diferentes propuestas de actuación y mecanismo del componente, para de esta manera proponer las conclusiones y recomendaciones válidas correspondientes.

1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo debe ser el proceso de análisis para estudiar y desarrollar los aspectos fundamentales en el diseño preliminar de una tobera de empuje vectorial, de tal modo que se obtenga el rendimiento más óptimo?

2. JUSTIFICACIÓN

La Industria Aeronáutica esta en constante cambio y cada vez se desarrollan nuevos avances tecnológicos para conseguir características de mejor rendimiento en los aviones, uno de estos dispositivos, diseñados para crear estas condiciones han sido el estudio de las toberas de empuje vectorial, las cuales son utilizadas por muchas aeronaves militares en régimen supersónico llegando a conseguir incrementos importantes en la maniobrabilidad durante combate.

Este tipo de tobera es utilizada por aviones militares como lo son: Eurofighter, F22 raptor, SU-37, etc., Mediante la aplicación de este mecanismo se consigue mayor maniobrabilidad de acuerdo a las operaciones y necesidades requeridas.

El mejoramiento de cada componente para obtener la mejor eficiencia a un bajo costo, es la prioridad que se busca actualmente, de esta manera, es importante que se investiguen los medios para optimizar los elementos que ya están diseñados, o los cuales se les deba realizar una modificación para que cumplan una misión determinada.

Es entonces necesario, que la investigación sobre los avances tecnológicos aplicables más recientes, en este caso de las toberas vectoriales, sea de gran importancia para el avance en el conocimiento y desarrollo de proyectos en la facultad de Ingeniería Aeronáutica.

De esta manera, a través del proyecto se pretende mostrar el funcionamiento, diseño de este tipo de dispositivo, sus ventajas y la importancia que tiene su desarrollo tecnológico y su aporte para la pequeña industria aeronáutica que apenas crece en el país.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un proceso metodológico de análisis para estudiar y desarrollar los aspectos fundamentales en el diseño preliminar de una tobera de empuje vectorial.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer una metodología para el cálculo termogasodinámico del flujo de gas y su comportamiento dentro de la tobera vectorial.

- Estudiar el comportamiento del flujo dentro de la tobera en diferentes ángulos y los regímenes de operación subsónica y supersónica.

- Proponer y analizar el mecanismo de movimiento dimensional y su respectivo sistema de actuación.

- Realizar el diseño preliminar del sistema hidráulico para la actuación del mecanismo.

- Analizar y seleccionar los materiales necesarios que cumplan con las condiciones requeridas.

- Desarrollar una metodología para el diseño de toberas de empuje vectorial.

4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

4.1 ALCANCE

En el proyecto se realizará todo lo concerniente a la parte de los cálculos termogasodinámicos básicos, el diseño preliminar del mecanismo abarcando únicamente la parte de ubicación de actuadores, pivotes, descripción inicial del movimiento y su correspondiente actuación, el análisis estructural y el desarrollo inicial del sistema hidráulico. Se obviará la parte de automatización o el funcionamiento automático del mecanismo ya que esto tiene un grado de complejidad tecnológica bastante alto y requiere otro tipo de estudio. Tampoco será profundizada la parte de desarrollo electrónico, solo será tenido en cuenta para los cálculos básicos.

El análisis en la parte de vectorización, está enfocado al estudio de los diferentes métodos propuestos teniendo en cuenta un ángulo máximo de 15 grados de vectorización (criterio de diseño) para que según el método escogido, se puedan evaluar los respectivos comportamientos con respecto a las posiciones de vectorización (cero, cinco, diez y quince grados de vectorización).

Los cálculos iniciales serán basados en información estadística sobre motores de régimen supersónico utilizados por aviones de combate previamente investigados, de esta forma serán escogidos algunos parámetros iniciales con los cuales se comenzará el desarrollo de todo el diseño de la tobera (los parámetros se tomarán en base a información bibliográfica).

4.2 LIMITACIONES

Por el tipo de proyecto y gran cantidad de costosos equipos que se necesitan para realizar la verificación de los datos (es necesario tener un banco de prueba para toberas de flujo supersónico), no se podrá tener una certificación de los cálculos de diseño que serán tratados en este proyecto. Sin embargo existen programas especializados en el estudio de comportamiento de flujos a través de diferentes superficies ya sea en 2D o en 3D, para este caso se utilizará para realizar las aproximaciones necesarias a partir del programa FLUENT 6, el cual permite estudiar las características y comportamiento del flujo en las condiciones que se

proponen, además se utilizará el programa ANSYS para validar los datos del análisis estructural.

La información bibliográfica es bastante reducida, lo cual limitará la cantidad de información sobre la cual se podrá trabajar, además de esto, la cantidad de tiempo útil de trabajo en el proyecto se verá limitada ya que durante estos periodos se tienen que realizar las actividades extracurriculares y las prácticas empresariales respectivas requeridas por la facultad.

El lugar de trabajo será otra limitante así como la utilización de los programas de análisis, ya que estos se utilizan en las instalaciones de la universidad y no se tiene un disponibilidad del 100% de tiempo, adicional a esto, no hay personal capacitado en el manejo del software, lo cual dificulta el manejo del mismo, así como también, genera la posibilidad de que algunos interrogantes no puedan ser respondidos con claridad.

5. RECURSOS

5.1 RECURSOS HUMANOS

Este proyecto será desarrollado por los siguientes estudiantes del programa de Ingeniería Aeronáutica:

- María Alejandra Alvarado Flórez.
- David Orlando Castillo Tibocha.
- Nicolás Alberto Patiño Cruz.

El trabajo de investigación será supervisado por el Ingeniero Mag. Fernando Colmenares, quien es el tutor del proyecto. Adicionalmente se necesitará la ayuda de algunos de los diferentes profesores que trabajan para el programa de Ingeniería Aeronáutica, especializados en temas específicos para el desarrollo del proyecto.

5.2 RECURSOS FINANCIEROS

Estos recursos del proyecto no se han estipulado, ya que para la parte de diseño o la parte conceptual estos recursos son poco relevantes en esta etapa del proyecto. Adicional a esto lo único por tener en cuenta financieramente equivale a los costos que requerirán la compra de los cartuchos de impresión, impresiones especiales, papel, etc., lo que haría parte de material adicional. Artículos adicionales tales como computadores, CD´s, re - grabables, papel para impresiones varias, unidades portables de memoria, etc.

5.3 RECURSOS FÍSICOS

Principalmente se utilizará algunos programas de sistemas como lo son SolidEdge, Word, Excel, AutoFEA 10.0 y FLUENT 6.2, así como el respectivo computador donde trabajar para comenzar el desarrollo del proyecto. Para este caso, se necesitará utilizar los servicios de los laboratorios de informática de la Universidad, ya que estas instalaciones cuentan con los equipos adecuados para realizar los diferentes estudios requeridos.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 RESEÑA HISTÓRICA

Estas toberas de empuje vectorial son usadas en aviones de combate y la utilización de estas ha tenido un incremento en las últimas décadas. Las toberas vectoriales han sido utilizadas en despegue y aterrizaje vertical (VTOL) par aviones, como AV-8 Harrier, y el propósito es proveer o mejorar la maniobrabilidad y aumentar la sustentación en combate. El empuje vectorial aumenta la potencia, y se están desarrollando para aviones nuevos, sin embargo, la refrigeración de la tobera es muy difícil.

6.2 ANTECEDENTES

Uno de los mejores ejemplos en el que se muestra el desarrollo de este tipo de tecnología, se puede observar en el motor F119-PW-100 manufacturado por la compañía Pratt & Whitney (West Palm Beach).

Las características de los motores son evaluadas, como se muestra en el anexo D esta tobera puede pivotar 20^{o} de cualquier manera, este tipo de tobera es utilizada por la aeronave de combate Raptor F-22, proporcionándole mayor maniobrabilidad.

El movimiento de la tobera imposibilita al piloto para controlar la tobera a disposición, por esto, cuenta con un mecanismo automático controlado por el avión, este dispositivo es controlado electrónicamente digital (FADEC), el cual es el responsable de intervenir en algunas características del avión.

6.3 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS TOBERAS

Las toberas en general tienen por misión dirigir los gases de descarga de la turbina a la atmósfera, son las encargadas de transformar la energía calorífica en energía cinética, el propósito es incrementar la velocidad antes de ser descargada.

Para altos valores de empuje específico se necesita, la energía cinética de la salida del gas puede ser alta, lo cual requiere velocidad alta en la salida, una parte de la presión atraviesa la tobera controlando el proceso de expansión, el máximo empuje que se puede obtener es cuando cumple con la siguiente condición: la presión de salida P_e es igual a la presión ambiente P_0.

Esta componente es parte fundamental de un motor, por eso hay que tener en cuenta el desempeño de esta tobera considerando costos, peso y mantenimiento.

Existe gran variedad de sistemas de escape, divididas en 2 categorías:

- Toberas fijas incluyendo toberas cónicas.

- Toberas área variable incluyendo toberas convergente –divergente.

La selección de un tipo de sistema de salida se determinada por los requerimientos tales como: el tipo de motor, la aeronave y la misión que esta vaya a realizar.

Las toberas fijas cónicas son relativamente simples, en este tipo de toberas no hay partes móviles, esta compuesto por un conducto convergente, operan en régimen subsónico, particularmente se utilizan en aviación comercial. Las toberas de área variable, son requeridas para ciclos de motores donde sea necesario variar el área de salida, donde el numero de mach es esencialmente subsónico.

La toberas convergente – divergente son mas comunes de utilizar motores que tengan post - quemadores, la mayoría son utilizados con numero mach ≥ 1, en el caso tal que le flujo se considera supersónico.

El empuje vectorial es una técnica según el cual, la orientación del chorro de gases primario es variado par proveer un momento de control útil, en la mayoría de los casos es un sistema mecánico, cambiando la geometría de la tobera y genera empuje vectorial. Es un sistema encargado que usa el chorro de aire del secundario, para controlar el chorro de aire primario, la principal ventaja es del empuje vectorial es la obtención de un sistema eficiente.

7. DESARROLLO METODOLOGICO

En este punto se mostrarán las actividades principales para el desarrollo metodológico del Proyecto de Grado, hay que aclarar que de estas actividades principales se desglosarán unas sub-actividades que a medida que se vaya desarrollando serán mencionadas.

- Selección de parámetros para iniciar el diseño conceptual.

- Cálculo termogasodinámico (proponer metodología).

- Estudio del flujo supersónico y subsónico para la tobera a trabajar.

- Diseño preliminar del mecanismo actuador.

- Diseño preliminar del sistema hidráulico o neumático para la actuación de la tobera.

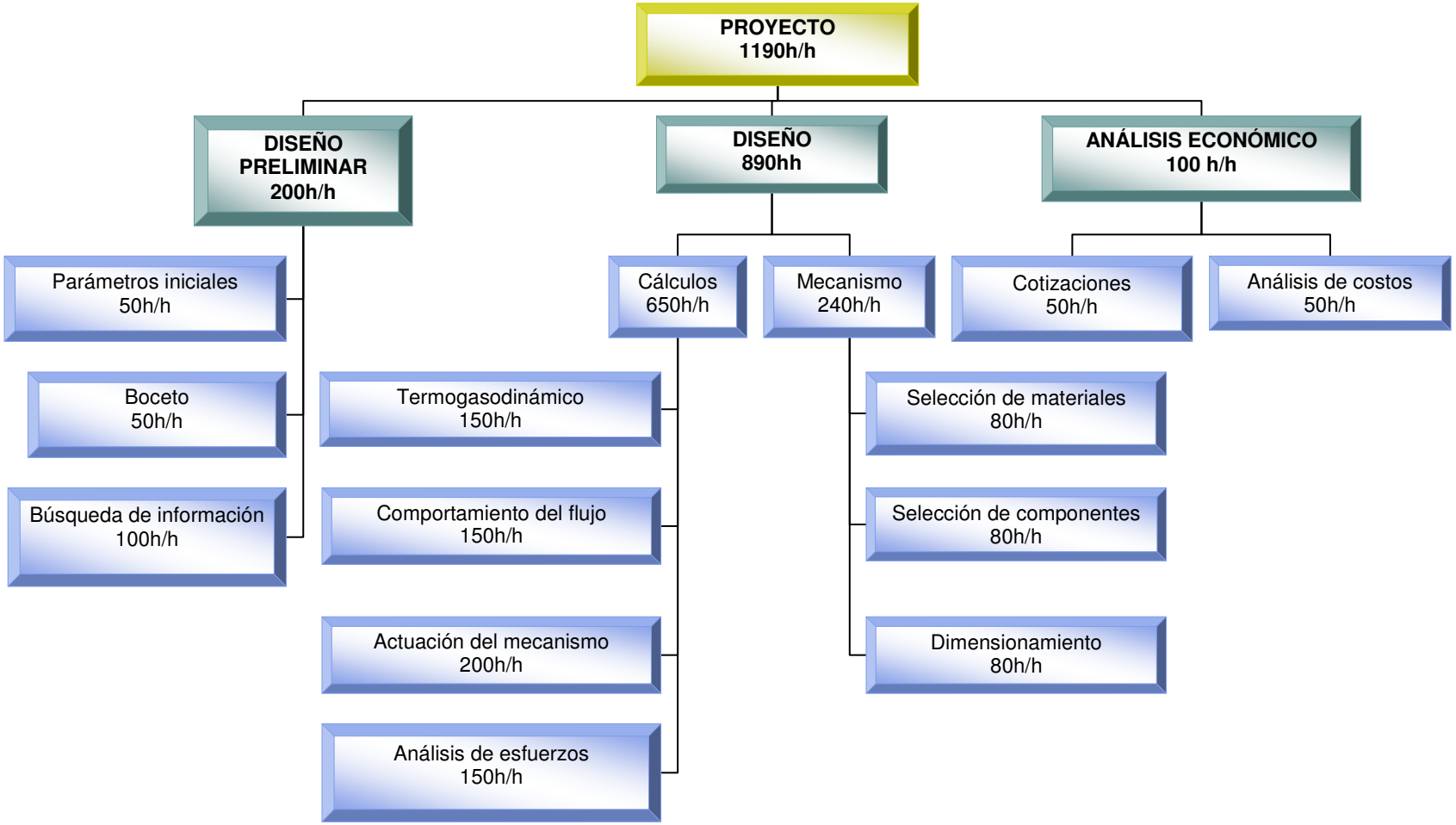
- Dimensionamiento.

- Análisis estructural preliminar del componente.

- Estudio de los materiales.

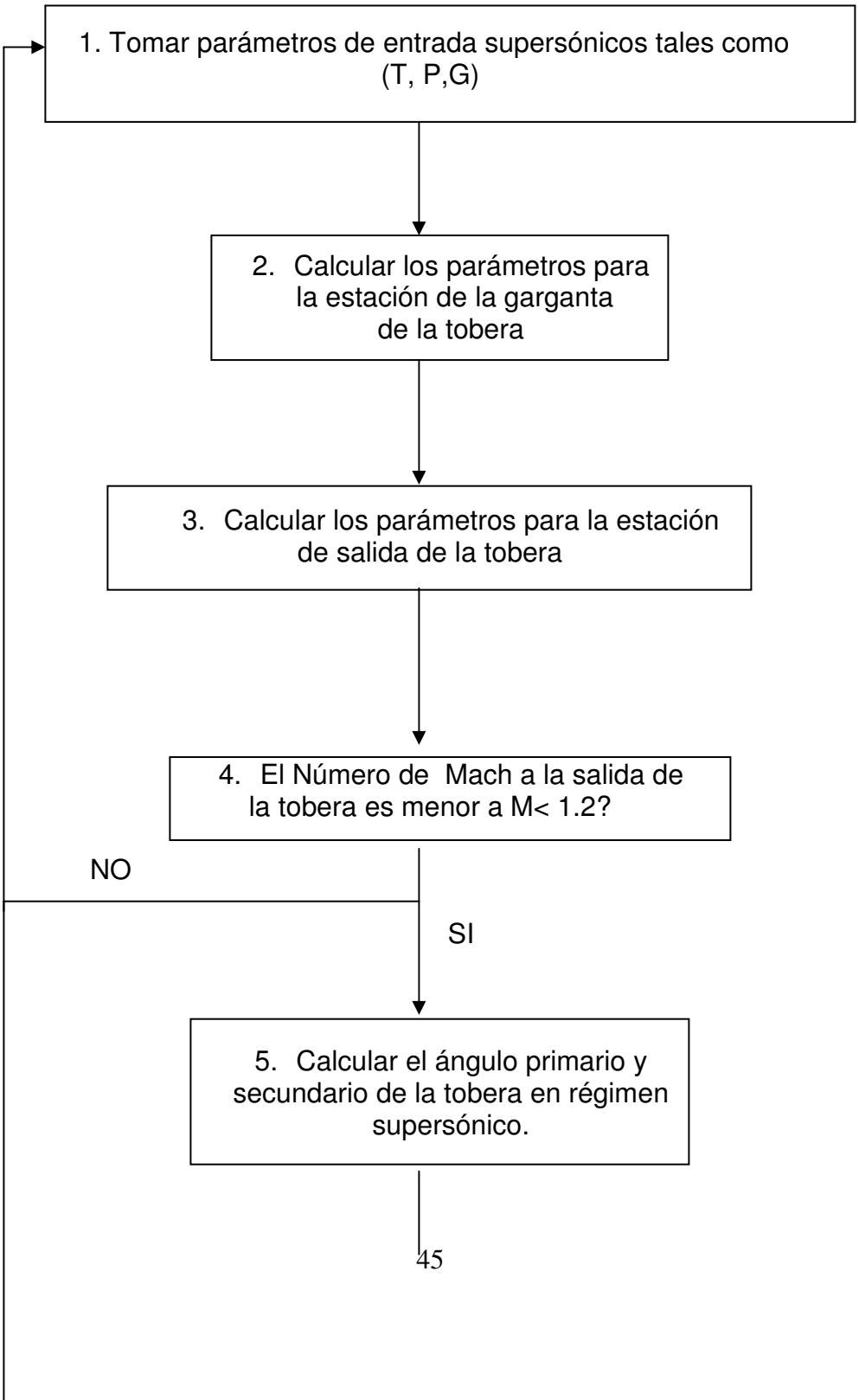
7.1 DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR

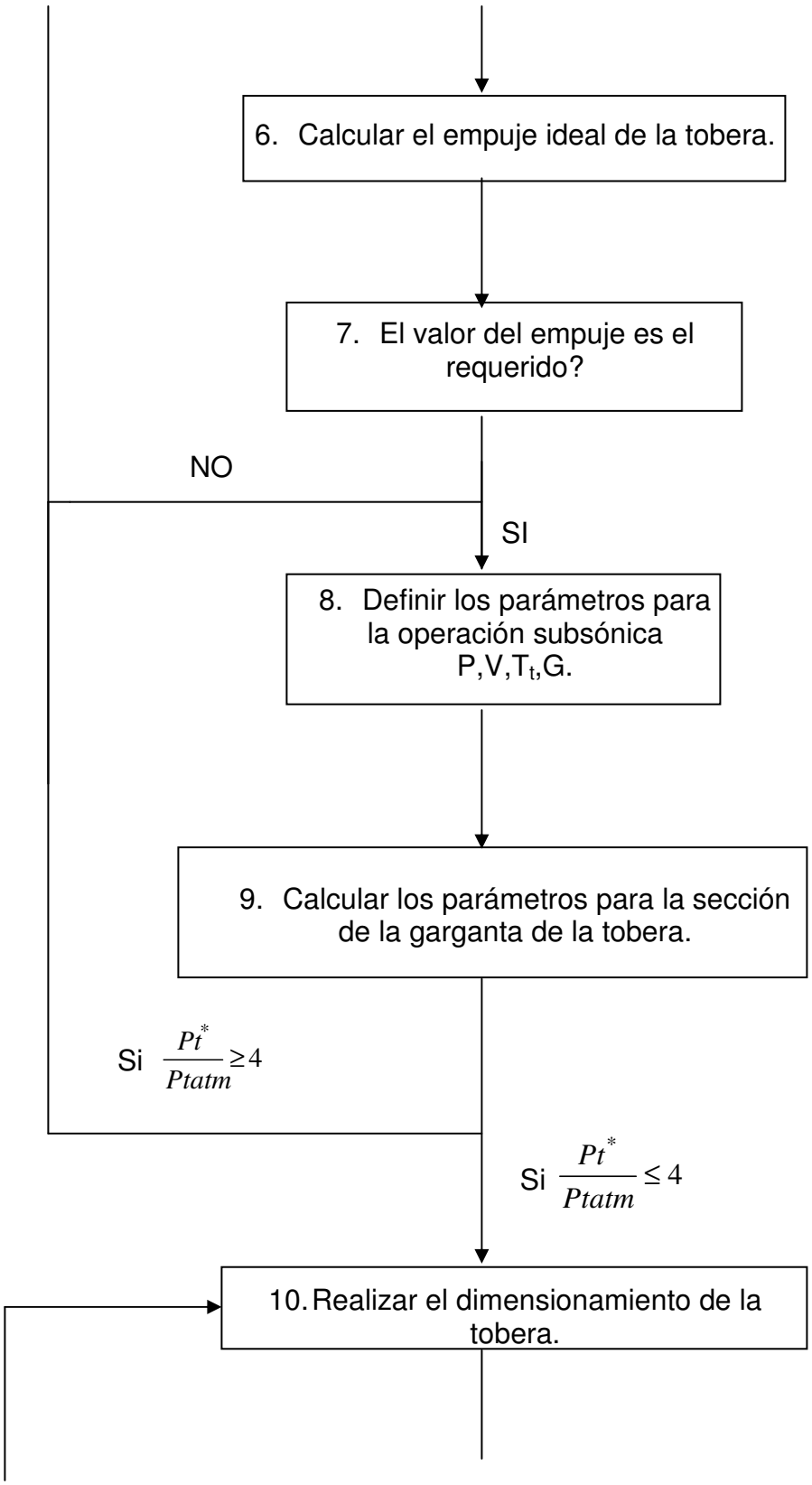
En este esquema se muestra el marco sobre el cual se desarrolla el proyecto, los datos propuestos son únicamente información de referencia ideal sobre la cual se plantea el desarrollo del todo el proyecto, no son valores reales.

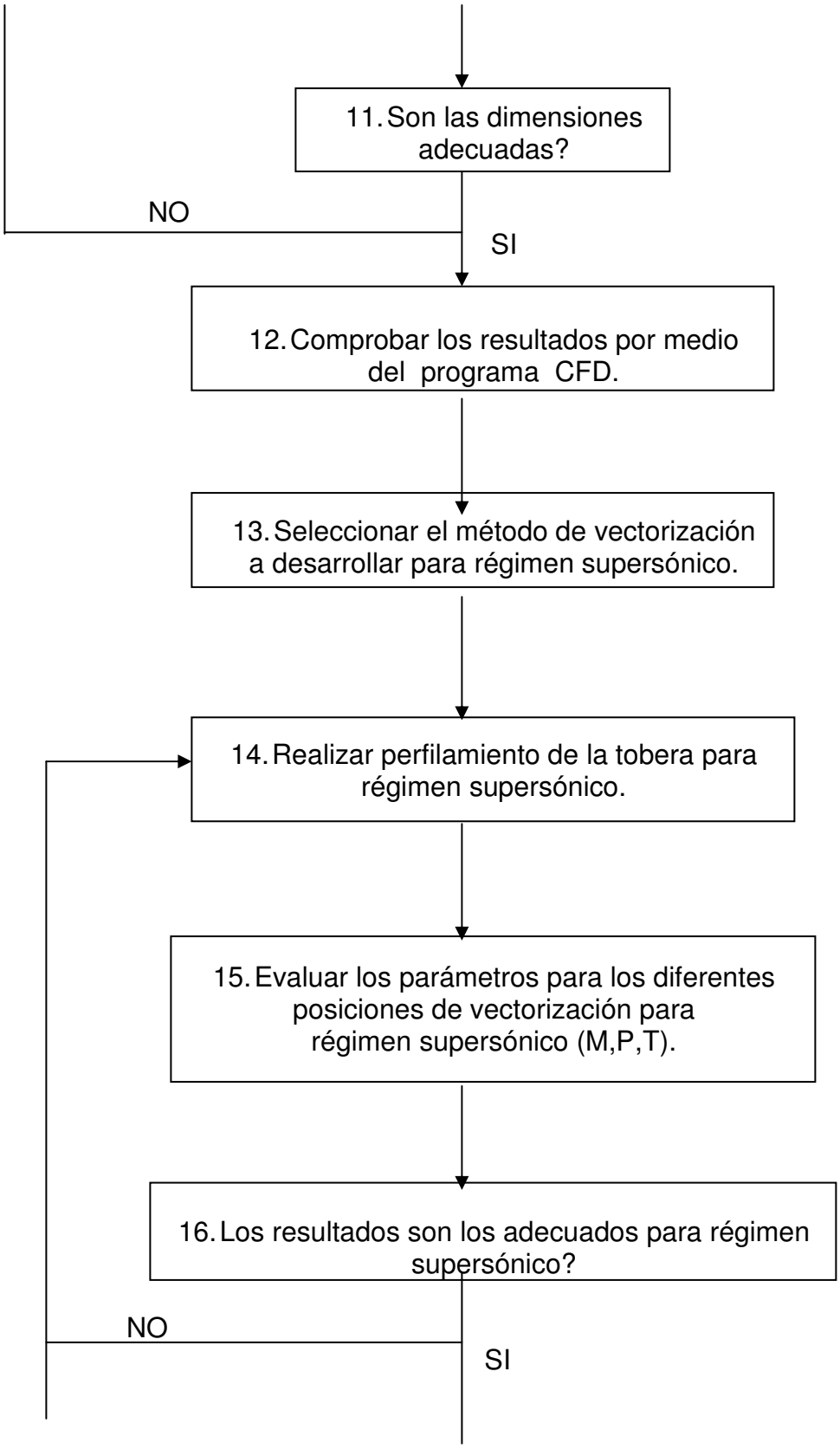


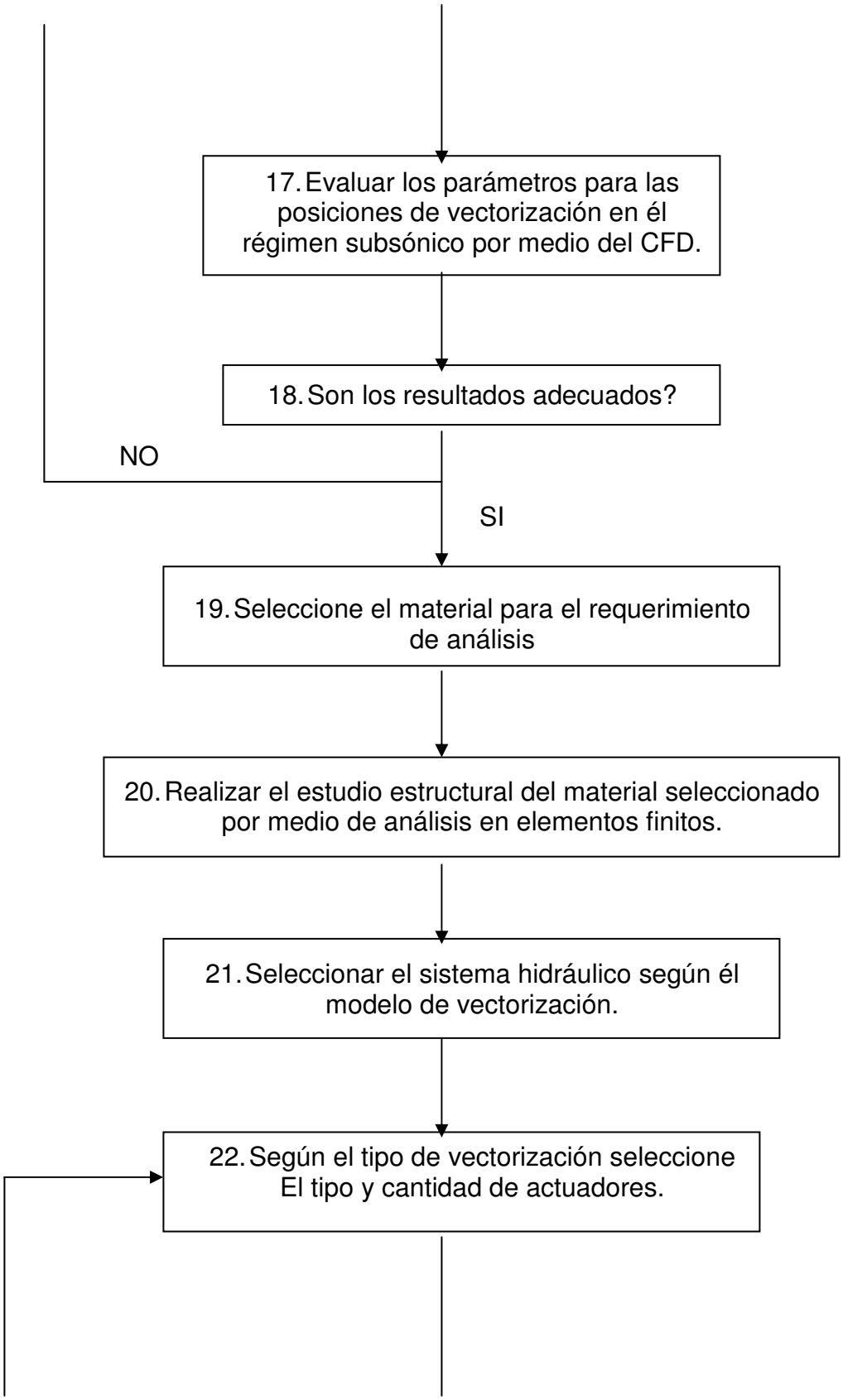
7.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA

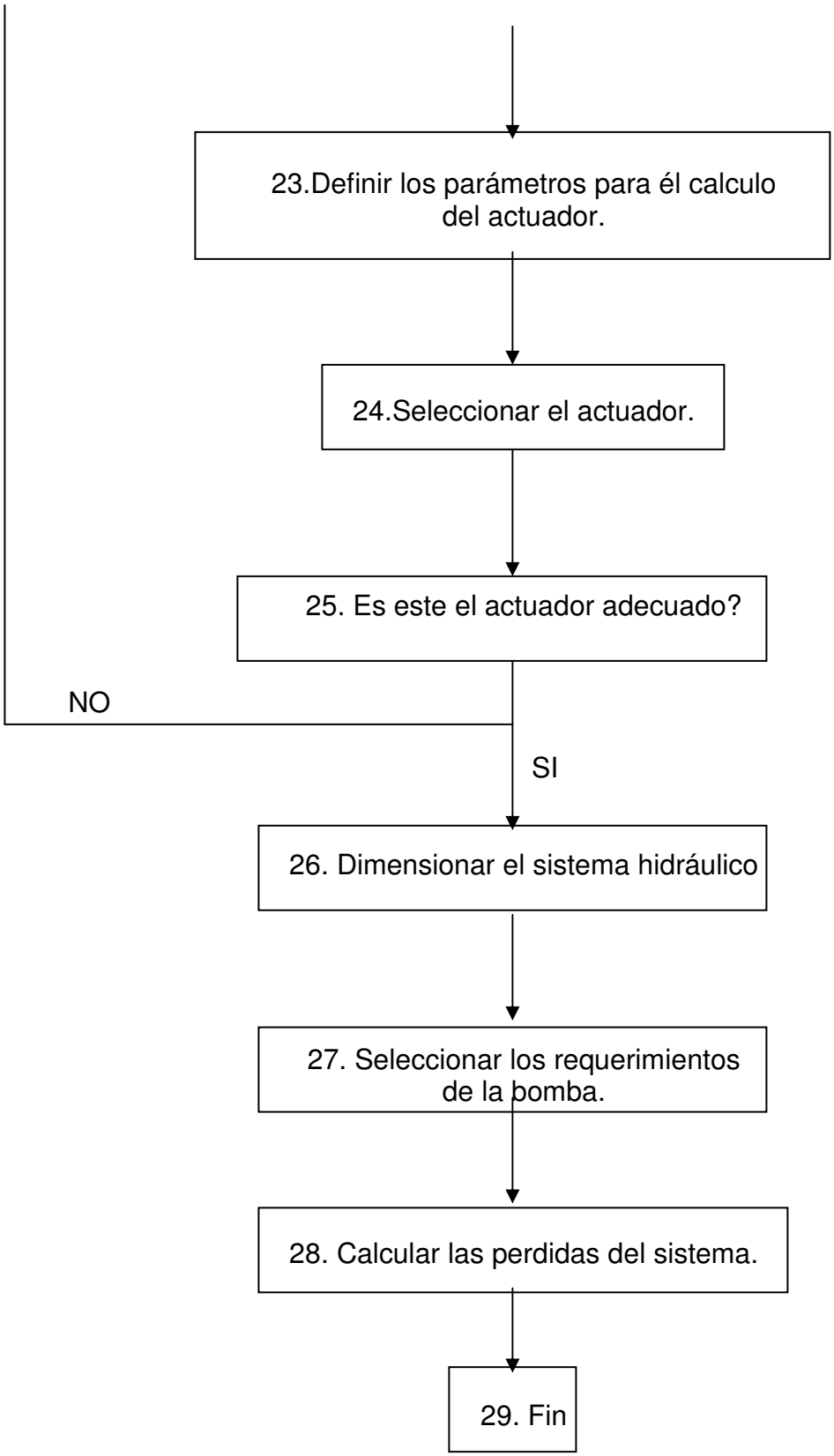
A continuación, por medio de un diagrama de flujo se explica como se desarrollará la metodología




6. Calcular el empuje ideal de la tobera.
7. El valor del empuje es el requerido?
NO
SI
8. Definir los parámetros para la operación subsónica P,V,T_t,G.
9. Calcular los parámetros para la sección de la garganta de la tobera.
Si $\frac{Pt^*}{Ptatm} \geq 4$
Si $\frac{Pt^*}{Ptatm} \leq 4$
10. Realizar el dimensionamiento de la tobera.


11. Son las dimensiones adecuadas?
NO
SI
12. Comprobar los resultados por medio del programa CFD.
13. Seleccionar el método de vectorización a desarrollar para régimen supersónico.
14. Realizar perfilamiento de la tobera para régimen supersónico.
15. Evaluar los parámetros para los diferentes posiciones de vectorización para régimen supersónico (M,P,T).
16. Los resultados son los adecuados para régimen supersónico?
NO
SI


17. Evaluar los parámetros para las posiciones de vectorización en él régimen subsónico por medio del CFD.
18. Son los resultados adecuados?
NO
SI
19. Seleccione el material para el requerimiento de análisis
20. Realizar el estudio estructural del material seleccionado por medio de análisis en elementos finitos.
21. Seleccionar el sistema hidráulico según él modelo de vectorización.
22. Según el tipo de vectorización seleccione El tipo y cantidad de actuadores.

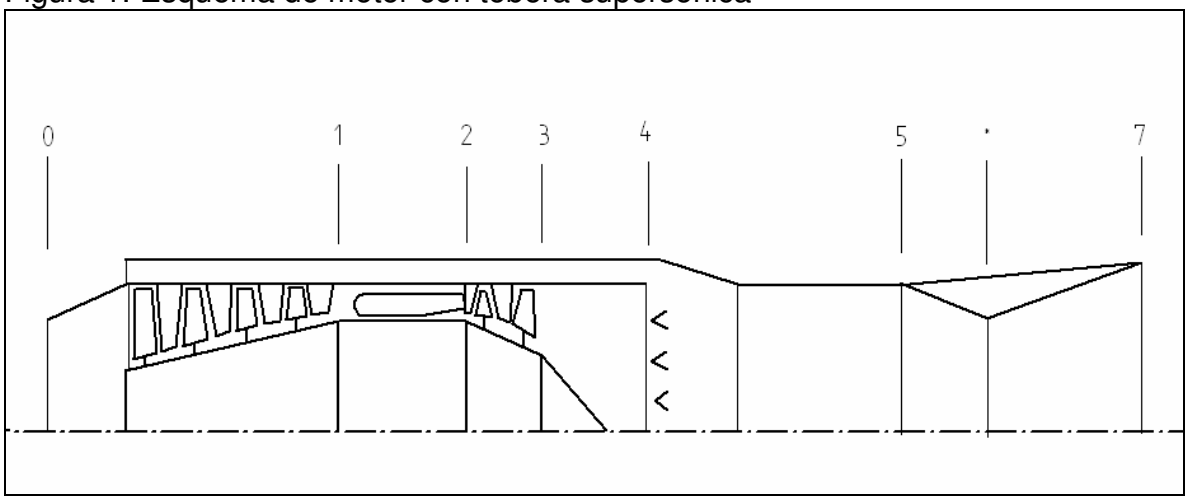

23.Definir los parámetros para él calculo del actuador.
24.Seleccionar el actuador.
25. Es este el actuador adecuado?
NO
SI
26. Dimensionar el sistema hidráulico
27. Seleccionar los requerimientos de la bomba.
28. Calcular las perdidas del sistema.
29. Fin

8. DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR DE UNA TOBERA

El diseño de una tobera, así como el de cualquiera de los componentes en un motor a reacción, implica una serie de variables y procedimientos que permiten tener una aproximación más correcta y acertada hacia el funcionamiento ideal del componente, de esta forma, se propone que la fase inicial de diseñó deba estar enfocada hacia el planteamiento de las principales características de operación, así como también, la definición de algunos parámetros iniciales con las que en condiciones de diseño, el componente, en este caso la tobera, va a funcionar.

La tobera se puede mostrar esquemáticamente en la figura 1 como parte de un motor turbofan con post – quemador de flujo mixto, seleccionado en este caso como criterio de diseño, la tobera supersónica está representada desde la estación 5 hasta la 7.

Figura 1. Esquema de motor con tobera supersónica



Diseño del autor

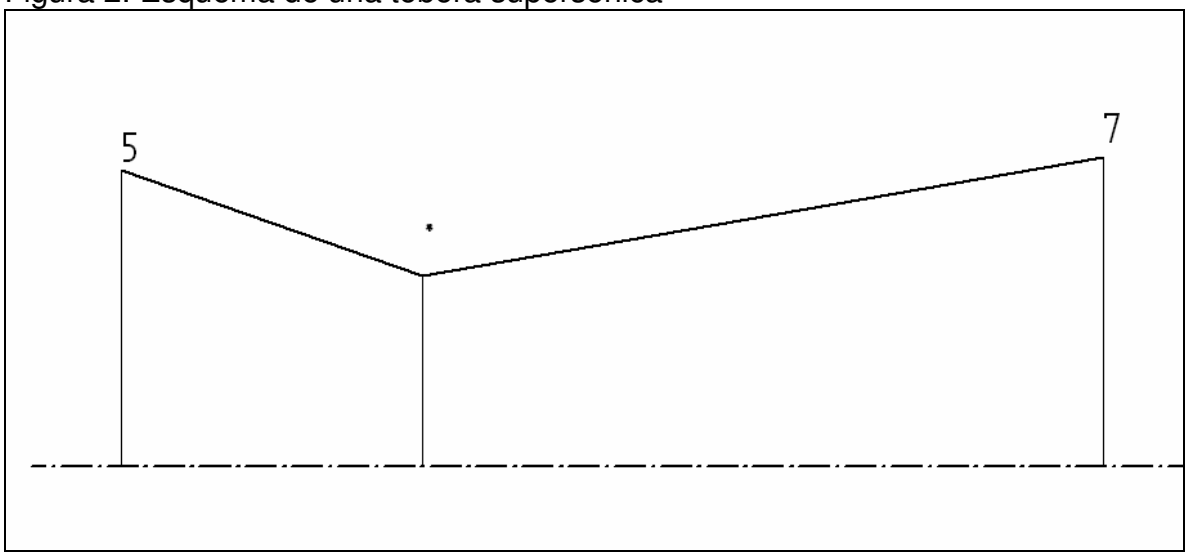
8.1 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS INICIALES PARA FLUJO SUPERSÓNICO

NOTA: Las ecuaciones que hacen parte de esta metodología fueron tomadas de las referencias bibliográficas 1, 2, 3 y 7.

8.1.1 Definición de las características de funcionamiento de la tobera supersónica. El funcionamiento de la tobera está basado en el análisis del flujo con movimiento uni-dimesional, con las características con las que el flujo cuenta al llegar a la tobera usualmente, esto permite una mayor simplificación en los cálculos.

Para este proyecto se ha investigado en varias fuentes acerca de los regimenes de trabajo mas usuales de las toberas, que en este caso, ven su uso más frecuente en la industria militar, acorde a esto, se puede utilizar una tabla con características de motores similares al caso que se va a manejar (tabla 1), de esta forma se pueden tener requisitos iniciales aproximados de la función que el motor, y en este caso en especial, la tobera deban a cumplir. Esta herramienta permitirá tener un valor aproximado de cómo será el comportamiento de la tobera y en que condiciones comparables con otros motores la tobera podría trabajar.

Figura 2. Esquema de una tobera supersónica



Diseño del autor

Esquemáticamente se puede representar una tobera como se muestra en la figura 2. La estación 5 representa la entrada de los gases en la tobera, la estación intermedia representa la garganta (*) y la estación 7 es la salida. Partiendo de esto, para comenzar el estudio se pueden proponer entonces los siguientes datos de entrada para diseñar la tobera.

El procedimiento metodológico está desarrollado con el fin de que siguiendo los pasos planteados se diseñe una tobera en sus conceptos y características

principales de operación, adicionalmente se trabajará un ejercicio con el cual se puede mostrar los resultados para el procedimiento, de la manera como se observa a continuación:

NOTA: El primer número en el procedimiento que se expondrá a continuación, indica la parte teórica de la metodología y el segundo número repetido indica el cálculo para el ejemplo propuesto, aclarando así, que la numeración es repetitiva debido al diseño y desarrollo de la metodología.

1) Flujo másico. El primer paso consiste en asumir una cantidad de flujo másico. Este valor proviene de la mezcla aire - combustible en los turborreactores, muchas de las veces, para alcanzar el empuje supersónico en aviones de combate, el flujo de gases es de nuevo encendido por medio de un componente llamado post-quemador. Se puede asumir el flujo luego de que ha pasado por un post-quemador, esto haría del análisis algo más acertado y cercano a las condiciones de uso para lo que se piensa diseñar. Usualmente los motores de alto empuje usados en la industria militar utilizan un post-quemador como medio para incrementar el empuje en condiciones de combate o despegue, alcanzando grandes velocidades y regimenes de empuje a un alto costo en el gasto de consumo específico de combustible.

El flujo másico de aire se puede calcular estadísticamente de motores que tengan las mismas características de operación con respecto a lo que se está diseñando. "El flujo másico de combustible en condiciones de post-combustión está en un aproximado de 6000 lbm/h"[1].

$$\dot{m}_{i} = \dot{m}_{5\,i} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}$$

1) Teniendo en cuenta esto para un ejemplo:

$$\dot{m}_{fuel} = 5.573\ {Kg}/{s}$$

$$\dot{m}_{aire} = 114.42\ {Kg}/{s}$$

[1] OATES, Gordon C. Aircraft propulsion systems technology and design. AIAA Education Series. . 754 p.

Tabla 1. Información general sobre motores utilizados en aviación militar

Model No.	Empuje (Kgf)	SFC al max.(Kg/hr)	flujo másico (Kg/sec)	OPR Πc (stages)	D (m)	L (m)	Peso (Kgf)
F119-PW-100	15875,73						
F100-PW-229	13154,18/8073,944	TSFC 0,929/0,3356	112,5	23	1,1938	4,8514	1037
F110-GE-100	12981/8314	TSFC 0,9434/0,6667	115,21	30,4	1,1811	4,6228	1766
TF30-P-111	11385/6604,3	TSFC 1,11/0,3111	117,93	21,8	1,2446	6,1391	1813,9
F404-GE-400	7257,4			25	0,889	4,0386	
AL-31F	12496,4	0,8708	112,03		1,1684	4,953	1500
promedio	**11876,51**		**114,42**	**25,05**	**1,14**	**4,92**	**1529,23**

Model No.	TIT (°K)	Engines	FPR	BR	Remarks	A/C MACH
F119-PW-100		2			F-22	1,4
F100-PW-229	1755	1	3,8	0,4	F-16	2
F110-GE-100		1	2,98	0,8	F-16	2
TF30-P-111	1397,039	2	2,43	0,73	F-111	2,5
F404-GE-400				0,34	F-18	1,8
AL-31F					SU-27	
promedio	**1576,0195**		**3,07**	**0,5675**		**1,94**

Diseño del autor

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{5i} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}$$

$$\dot{m}_i = 114.42\,Kg/s + 5.573\,Kg/s$$

$$\boxed{\dot{m}_i = 119.993\,Kg/s}$$

2) Temperatura de entrada en la tobera. El segundo paso es identificar un valor aproximado para la temperatura de entrada en la tobera. Usualmente para motores de aviones supersónicos, los valores pueden variar entre los 1600°K. y los 2000°K.[(2)], estos valores de temperatura se pueden encontrar en bibliografía relacionada con este tema. Estos valores dependen típicamente del tipo de motor y el régimen de empuje que proporcionen, así mismo de otras características internas del mismo.

2) Para este caso asumiendo el valor máximo se tiene

$$\boxed{T_{5t} = 2000^{o}\,K}$$

3) Presión de salida de la tobera. En este paso, asumiendo condiciones ideales, se va a definir la presión de salida en la tobera, de esta manera, se sugiere que la presión de salida sea igual que la presión atmosférica, es decir, que se realiza la expansión completa de los gases en la tobera, esto solamente será utilizado para calcular el valor ideal en diseño del empuje producido.

$$\boxed{P_7 = P_0 = P_{ref} \times \delta}$$

Para este caso, Po indica la presión atmosférica en el medio que depende de la altitud de trabajo del motor (condiciones de diseño), P_{ref} es la presión de referencia o atmosférica al nivel del mar y δ identifica el radio de presiones que está en función de la altura a la que se esté trabajando (ver anexo A).

[(2)] Ibid., 754 p.

3) Para una altitud de operación de 10972.8 m (36000ft) se tiene la siguiente presión estática.

$$P_7 = 0.224 \times 1.013 \times 10^5 \, {\rm N}/{m^2}$$

$$\boxed{P_7 = 22691.2 \, N/m^2}$$

4) Velocidad de entrada. De la misma manera como se puede investigar la temperatura de entrada en la tobera, y asumiendo que el flujo proviene de un post-quemador para aumentar el empuje hasta un régimen supersónico, La velocidad de entrada en la tobera es una información adicional que permite tener una característica de diseño adicional para el perfilamiento de la tobera. "Normalmente la velocidad de salida luego de la etapa de post-combustión, no suele exceder el M = 0.5, a una velocidad de +/- 1200 ft/s (365.76 m/s)"[3]. Este valor que se propone es bastante útil, ya que sirve como punto de partida para desarrollar la siguiente parte teórica del proyecto.

4) Asumiendo el valor acorde a la referencia bibliográfica para este caso en particular

$$\boxed{V_5 = 365.76 \, m/s}$$

5) Área de entrada. El área de entrada es un aproximado promedio en el que se tiene en cuenta los datos de la tabla de motores para aviones militares (ver tabla 1), para motores de alto rendimiento que alcancen números de Mach elevados, es frecuente observar que la tobera es la parte más gruesa del motor, en este caso el lector puede estadísticamente de la misma forma, asumir su propia área de entrada, como un medio para facilitar el diseño preliminar y los cálculos termogasodinámicos iniciales de la tobera.

5) Teniendo en cuenta los valores promedio obtenidos en la tabla 1 se asume:

$$\boxed{A_5 = 0.5057 m^2}$$

[3] GUNSTON, Bill. Jet and Turbine Aero Engines. Patrick Stephens limited. 1997. p. 300.

El área sería recomendable asumirla de sección transversal cuadrada, adicionalmente, los bordes serán redondeados con el fin de hacer un cálculo más acertado de los esfuerzos que el componente va a soportar y a su vez reducir los posibles concentradores de esfuerzos que se puedan generar. El cálculo de los bordes se realizará más adelante cuando las dimensiones principales de la tobera hayan sido medidas.

8.2 DISEÑÓ INICIAL DE LA TOBERA SUPERSÓNICA

Partiendo de los parámetros propuestos y teniendo en cuenta las leyes físicas de movimiento de los fluidos, se puede determinar el comportamiento del flujo, a lo largo de diferentes secciones en la tobera, para este caso son calculadas en la entrada, la salida y en la garganta. De esta forma se puede comenzar con los parámetros estáticos en la primera estación esto con el fin de determinar como será el comportamiento de la tobera y cuales serán las dimensiones con las que la misma será diseñada.

8.2.1 Análisis en la entrada en la tobera.

6) Usando la definición de temperatura total y estática, se puede encontrar el valor de la temperatura estática a partir de la siguiente ecuación termodinámica:

$$T_{5t} = T_5 + \frac{V_5^{\,2}}{2 \bullet g_c \bullet Cp}$$

6) Así para el ejemplo:

$$2000^o K = T_5 + \frac{(365.76 \, m/s)^2}{2 \bullet 1.0115 \frac{Kg.m}{N.s^2} \bullet 0.28 \, Kcal/Kg.^o K \bullet 4186 N.m/1Kcal}$$

$$T_5 = 2000^o K - \frac{(365.76 \, m/s)^2}{2 \bullet 1.0115 \frac{Kg.m}{N.s^2} \bullet 0.28 \, Kcal/Kg.^o K \bullet 4186 \, N.m/1Kcal}$$

$$\boxed{T_5 = 1943.582^o K}$$

7) Con el resultado obtenido ahora se puede determinar el número de Mach a la entrada de la tobera a través de las siguientes fórmulas:

$$\boxed{M_5 = \frac{V_5}{a_5}}$$

Donde:

$$\boxed{a_5 = \sqrt{\gamma \bullet R \bullet g_c \bullet T_5}}$$

7) Así, para el caso del ejemplo, despejando:

$$M_5 = \frac{365.76\, {}^{m}\!/\!_{s}}{\sqrt{1.33 \bullet 289.3\, {}^{N.m}\!/\!_{Kg.^o K} \bullet 1.0115\, {}^{Kg.m}\!/\!_{N.s^2} \bullet 1943.582^o K}}$$

$$M_5 = \frac{365.76\, {}^{m}\!/\!_{s}}{869.783\, {}^{m}\!/\!_{s}}$$

$$\boxed{M_5 = 0.4205 \approx 0.421}$$

8) Acorde a estos resultados y teniendo en cuenta las fórmulas para flujo compresible, que se pueden observar en el apéndice B de este proyecto, para flujo de aire luego del proceso de combustión (γ = 1.33), se pueden obtener los siguientes valores para el número de Mach calculado en la entrada de la tobera:

$$\boxed{\frac{T_5}{T_{5t}}; \frac{\rho_5}{\rho_{5t}}; \frac{P_5}{P_{5t}}; \frac{A_5}{A^*}; MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}};}$$

8) De esta forma observando en el apéndice B se tiene para el Número de Mach obtenido las siguientes relaciones:

$$\frac{T_5}{T_{5t}} = 0.971717 \qquad \frac{\rho_5}{\rho_{5t}} = 0.916731 \qquad MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}} = 0.437711$$

$$\frac{P_5}{P_{5t}} = 0.890804 \qquad \frac{A_5}{A^*} = 1.5367$$

9) Con estos datos se puede determinar los demás parámetros del flujo de la siguiente manera.

De acuerdo a la ecuación ***Mass Flow Parameter*** (MFP) se tiene:

$$MFP = \frac{\dot{m}_{5i} \bullet \sqrt{T_{5t}}}{P_{5t} \bullet A_5}$$

"El MFP resulta de la combinación de algunas propiedades termodinámicas y es únicamente función del Número de Mach en un gas calorífico perfecto"[(4)]. De esta manera cuando se dibuja la función para un γ =1.33 de los gases calientes de escape, se obtiene la gráfica de la figura 3.

Despejando la presión total a la entrada de la tobera y adicionando la relación entre la constante de los gases ideales y la constante de Newton se obtiene:

$$P_{5t} = \frac{\dot{m}_{5i} \bullet \sqrt{T_{5t}} \bullet \sqrt{\frac{R}{g_c}}}{A_5 \bullet MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}}}$$

[(4)] MATTINGLY, Jack M. Element of gas turbine propulsión. McGraw-Hill. 1996. p. 125.

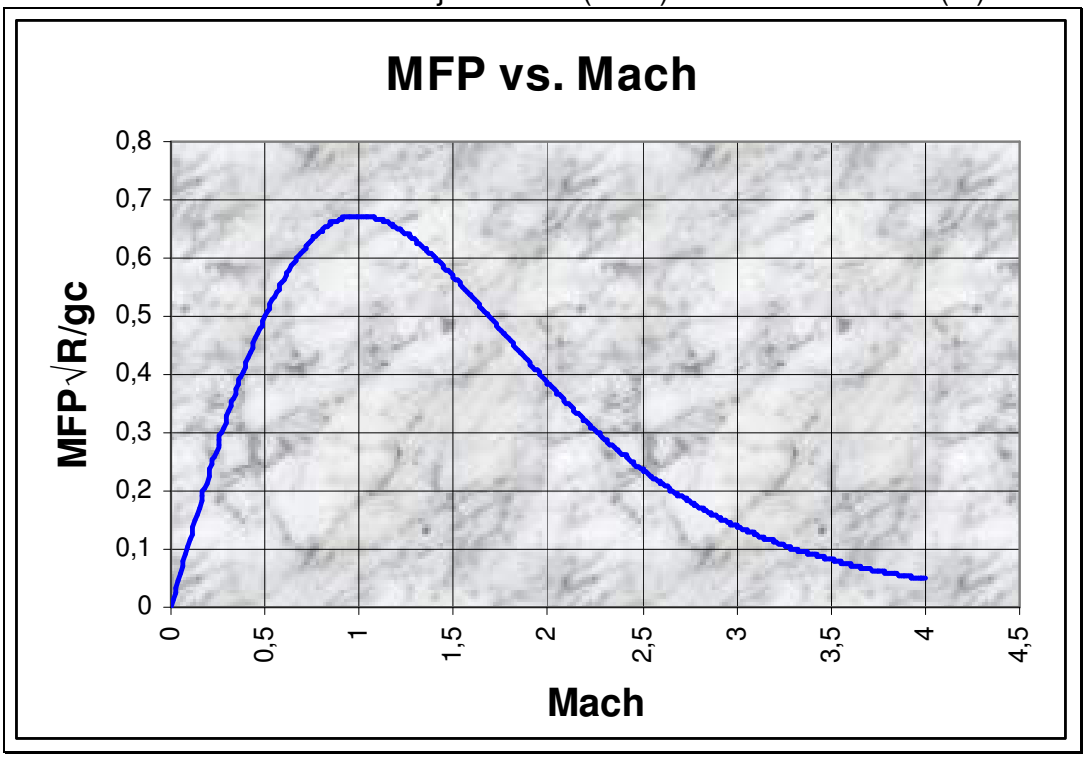
9) Así para el ejemplo reemplazando es posible calcular la presión total en la entrada de la tobera:

$$P_{5t} = \frac{119.993\,\dot{}\,{}^{Kg}\!/_{s} \bullet \sqrt{2000^{o} K} \bullet 16.9115 \frac{N.s}{Kg.\sqrt{°K}}}{0.5057 m^2 \bullet 0.437711}$$

$$P_{5t} = \frac{119.993\,\dot{}\,{}^{Kg}\!/_{s} \bullet 756.305\,{}^{N.s}\!/_{Kg}}{0.22135 m^2}$$

$$\boxed{P_{5t} = 409989.4\,{}^{N}\!/_{m^2}}$$

Figura 3. Gráfica Parámetro de flujo másico (MFP) vs. Número Mach (M)



Element of gas turbine Propulsion.

10) Ahora tomando en cuenta la ley de la conservación de la masa se tiene:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

$$\dot{m}_{5i} = \dot{m}_{i}^{*} = \dot{m}_{7i}$$

$$\dot{m}_{5i} = \rho_5 \bullet A_5 \bullet V_5$$

De esta manera despejando es posible calcular la densidad del flujo de gases en la entrada en la tobera.

10) Ahora despejando la densidad y calculando para el ejemplo:

$$\rho_5 = \frac{m_{5i}}{A_5 \bullet V_5}$$

$$\rho_5 = \frac{119.993\, Kg/s}{0.5057 m^2 \bullet 365.76\, m/s}$$

$$\rho_5 = 0.6487\ Kg/m^3$$

11) Con este valor ahora se puede calcular la presión estática en la estación 5 de la tobera, aplicando la siguiente ecuación donde se relaciona la presión dinámica y la total:

$$P_{5t} = P_5 + \frac{\rho_5 (V_5)^2}{2 \bullet g_c}$$

$$P_5 = P_{5t} - \frac{\rho_5 (V_5)^2}{2\, g_c}$$

11) Aplicando al ejemplo propuesto se obtiene:

$$P_5 = 409989.4\,{}^{N}\!/_{m^2} - \frac{0.6487\,{}^{Kg}\!/_{m^3} \bullet \left(365.76\,{}^{m}\!/_{s}\right)^2}{2 \bullet 1.0115\,\frac{Kg.m}{N.s^2}}$$

$$P_5 = 409989.4\,{}^{N}\!/_{m^2} - 42900.59\,{}^{N}\!/_{m^2}$$

$$\boxed{P_5 = 367088.8\,{}^{N}\!/_{m^2}}$$

12) Para comprobar este resultado se puede utilizar la relación para flujo compresible que anteriormente se obtuvo por tabla (apéndice A, M=0.42), en donde:

$$\frac{P}{Pt} = 0.890804$$

12) Reemplazando en el ejemplo de esta manera se obtiene lo siguiente:

$$P_5 = 0.890804 \bullet P_{5t}$$

$$P_5 = 0.890804 \bullet 409989.4\,{}^{N}\!/_{m^2}$$

$$\boxed{P_5 = 365220.2\,{}^{N}\!/_{m^2}}$$

De esta forma se pueden comprobar los resultados, el cálculo es bien aproximado, más no exacto, esto es debido a la cantidad de variables que se toman en cuenta y por el número de decimales con que se realizan las operaciones.

Se debe asegurar que la diferencia entre los valores de presión estática calculados previamente no sea alta, para este caso la diferencia entre los dos resultados es de aproximadamente 0.05%, lo cual asegura que lo desarrollado hasta al momento es correcto.

8.2.2 Análisis en la garganta de la tobera.

13) Partiendo de las relaciones antes planteadas es posible de la misma forma calcular el área de la garganta de la tobera, así:

$$\frac{A_5}{A^*} = 1.50819$$

$$\boxed{\frac{A_5}{A^*} = \frac{A_5}{A^*}}$$

$$A^* = \frac{A_5}{A_5 / A^*}$$

13) Despejando en el ejercicio planteado se tiene:

$$A^* = \frac{0.5057 m^2}{(1.50819)}$$

$$\boxed{A^* = 0.3353 m^2}$$

14) Al igual que para la estación de entrada de flujo en la tobera para este número de Mach (M=1 en la garganta), también se puede encontrar por medio del apéndice B las relaciones para flujo compresible en esta sección.

14) De esta manera observando en el apéndice B se tiene para este caso:

$$\frac{T^*}{Tt^*} = 0.858369 \qquad \frac{\rho^*}{\rho t^*} = 0.629524 \qquad MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}} = 0.672628$$

$$\frac{P^*}{Pt^*} = 0.540364 \qquad \frac{A^*}{A^*} = 1$$

15) "Para flujo isentrópico, el flujo se va a asumir con temperatura total constante a lo largo de toda la tobera"[5], esto quiere decir lo siguiente:

$$T_t = T_t^* = T_{5t} = T_{7t}$$

15) Para la tobera que en este caso se está desarrollando se tiene:

$$T_t = T_t^* = T_{5t} = T_{7t} = 2000°K$$

16) Partiendo de esto, el siguiente paso es medir la temperatura estática en la garganta por medio de las relaciones de flujo compresible,

$$\frac{T^*}{T_t^*} = 0.858369$$

16) donde reemplazando y calculando en el ejercicio se tiene:

$$T^* = 0.858369 \bullet 2000°K$$

$$T^* = 1716.74°K$$

17) Con la temperatura estática determinada, el paso a seguir es a través de la forma para hallar la velocidad del sonido y la velocidad del flujo en la garganta:

$$M^* = \frac{V^*}{a^*}$$

Donde:

[5] Ibid 4., p 119 - 122.

$$\boxed{a^* = \sqrt{\gamma \bullet R \bullet g_c \bullet T^*}}$$

17) Así, para el problema planteado:

$$a^* = \sqrt{1.33 \bullet 289.3 \, {}^{N.m}\!/_{Kg.^o K} \bullet 1.0115 \, {}^{Kg.m}\!/_{N.s^2} \bullet 1716.74^o K}$$

$$\boxed{a^* = 817.40 \, {}^{m}\!/_{s}}$$

$$V^* = M^* \bullet a^*$$

$$V^* = 1 \bullet \sqrt{1.33 \bullet 289.3 \, {}^{N.m}\!/_{Kg.^o K} \bullet 1.0115 \, {}^{Kg.m}\!/_{N.s^2} \bullet 1716.74^o K}$$

$$\boxed{V^* = 817.40 \, {}^{m}\!/_{s}}$$

18) De esta forma y a partir de la ley de la continuidad para calcular la densidad en la garganta:

$$\boxed{\dot{m}^* = \rho^* \bullet A^* \bullet V^* = \dot{m}_{5i} = \dot{m}_{7i}}$$

18) Ahora despejando la densidad y calculando para la tobera:

$$\rho^* = \frac{\dot{m}^*}{A^* \bullet V^*}$$

$$\rho^* = \frac{119.993 \, {}^{Kg}\!/_{s}}{0.3353 m^2 \bullet 817.40 \, {}^{m}\!/_{s}}$$

$$\boxed{\rho^* = 4.378 \times 10^{-1} \, {}^{Kg}\!/_{m^3}}$$

19) Con estos parámetros determinados y teniendo en cuenta que se tiene el MFP para esta estación de la tobera, se puede calcular la presión total en la garganta:

$$P^*_t = \frac{\dot{m}_i^* \bullet \sqrt{T_t^*} \bullet \sqrt{\frac{R}{g_c}}}{A^* \bullet MFP \sqrt{\frac{R}{g_c}}}$$

19) De esta forma reemplazando en el desarrollo propuesto:

$$P^*_t = \frac{119.993 \, {Kg}/{s} \bullet \sqrt{2000^o K} \bullet 16.9115 \frac{N.s}{Kg.\sqrt{^o K}}}{0.3353 m^2 \bullet 0.672628}$$

$$P^*_t = \frac{119.993 \, {Kg}/{s} \bullet 756.31 \, {N.s}/{Kg}}{0.225534 m^2}$$

$$\boxed{P^*_t = 402384.5 \, {N}/{m^2} \approx P_{5t} = 409989.4 \, {N}/{m^2}}$$

20) Como se puede observar, al mantener la temperatura constante a lo largo de la tobera, la presión total en cualquier punto de la misma es casi igual, variando solo en un 1,85 % del total, de esta forma, se puede asumir la misma presión total para la parte comprendida entre la garganta y la salida de la tobera, esto con el fin de reducir los cálculos de una manera aproximada, sin embargo, esto no quiere decir que la presión no cambie, por el contrario, tiene una leve caída, que más adelante será tenida en cuenta para calcular el valor real de la presión total en la salida de la garganta, por ahora se asume:

$$\boxed{P^*_t \approx P_{7t}}$$

NOTA: Si es posible calcular el valor de la presión en la salida de la tobera P_{7t} por algún método específico, se puede asegurar un cálculo más acertado.

20) Asumiendo esto se tiene:

$$\boxed{P^*_t = P_{7t} = 402384\ .5\ {}^{N}\!/_{m^2}}$$

21) Ahora, para finalizar esta estación del motor, por medio de las ecuaciones de flujo compresible es necesario calcular la presión estática en la garganta de la tobera:

$$\frac{P^*}{P^*_t} = 0.540364$$

21) De esta manera se tiene:

$$P^* = 0.540364 \bullet P^*_t$$

$$P^* = 0.540364 \bullet 402384.5\ {}^{N}\!/_{m^2}$$

$$\boxed{P^* = 217434.1\ {}^{N}\!/_{m^2}}$$

8.2.3 Análisis en la salida de la tobera.

22) Para esta etapa de la tobera se asume que en condiciones de diseño la presión a la salida de la tobera es igual a la presión atmosférica.

$$\boxed{P_{atm} = P_7}$$

22) De esta forma se tiene, para una altura de trabajo de 10972.8m (36000ft):

$$\boxed{P_{atm} = P_7 = 22700\, {N}/{m^2}}$$

23) De acuerdo a las ecuaciones de flujo compresible se tiene:

$$\frac{P_7}{P_{7t}} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-\gamma/(\gamma-1)}$$

De esta forma y como se había asumido antes, teniendo en cuenta que la presión total en la tobera es constante se puede calcular el número de Mach a la salida:

$$\left(\frac{P_7}{P_{7t}}\right)^{-(\gamma-1)/\gamma} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)$$

$$\frac{\gamma - 1}{2} M^2 = \left(\frac{P_7}{P_{7t}}\right)^{-(\gamma-1)/\gamma} - 1$$

$$M^2 = \frac{2}{\gamma - 1}\left[\left(\frac{P_7}{P_{7t}}\right)^{-(\gamma-1)/\gamma} - 1\right]$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1}\left[\left(\frac{P_7}{P_{7t}}\right)^{-(\gamma-1)/\gamma} - 1\right]}$$

23) Para el ejercicio se tiene:

$$M = \sqrt{\frac{2}{1.33-1}\left[\left(\frac{22700\,N/m^2}{402384.5\,N/m^2}\right)^{-(1.33-1)/1.33} - 1\right]}$$

$$\boxed{M = 2.51}$$

24) Para este número Mach (M=2.5) y utilizando el apéndice B es posible conocer las relaciones de flujo isentrópico:

24) Para este caso se tienen las siguientes condiciones:

$$\frac{P_7}{P_{7t}} = 0.05656 \qquad \frac{T_7}{T_{7t}} = 0.490312 \qquad MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}} = 0.233816$$

$$\frac{\rho_t}{\rho_{7t}} = 0.115356 \qquad \frac{A_7}{A^*} = 2.87674$$

25) Ahora a partir de esta información se puede calcular fácilmente el área de salida de la tobera, parámetro que es bastante importante tener en cuenta cuando se necesita la geometría completa de la tobera, para tener una idea de su tamaño real.

25) Para este caso se obtiene reemplazando:

$$\frac{A_7}{A^*} = 2.87674$$

Despejando:

$$A_7 = 2.87674 \bullet A^*$$

$$A_7 = 2.87674 \bullet 0.3353 m^2$$

$$\boxed{A_7 = 0.9646 m^2}$$

26) De la misma manera se puede calcular la temperatura estática a la salida:

26) Despejando:

$$\frac{T_7}{T_{7t}} = 0.490312$$

$$T_7 = 0.490312 \bullet T_{7t}$$

$$T_7 = 0.490312 \bullet 2000° K$$

$$\boxed{T_7 = 980.624° K}$$

27) Para ahora calcular la velocidad del sonido y la velocidad del flujo a la salida de la tobera:

$$\boxed{a_7 = \sqrt{\gamma \bullet R \bullet g_c \bullet T_7}}$$

27) Así:

$$a_7 = \sqrt{1.33 \bullet 289.3 \, {}^{N.m}\!/_{Kg.^o K} \bullet 1.0115 \, {}^{Kg.m}\!/_{N.s^2} \bullet 980.624^o K}$$

$$\boxed{a_7 = 617 .78 \, {}^{m}\!/_{s}}$$

$$V_7 = M_7 \bullet a_7$$

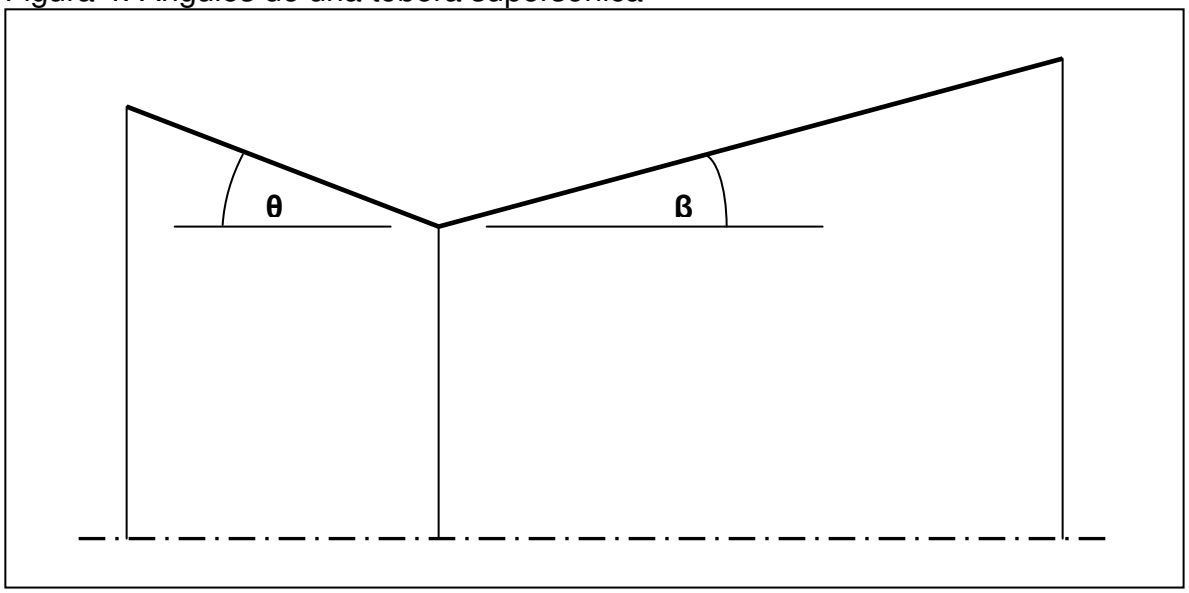
$$V_7 = 2.51 \bullet 617.78 \, {}^{m}\!/_{s}$$

$$\boxed{V_7 = 1550.629 \, {}^{m}\!/_{s}}$$

8.2.4 Ángulos principales de la tobera. En función de los datos obtenidos anteriormente, es posible hacer una primera aproximación para el desarrollo final de la geometría de la tobera, esto se puede hacer, por medio de algunos coeficientes con los cuales se puede tener una medida del rendimiento y de los parámetros bi-dimensionales del flujo dentro de la tobera laval.

De esta forma para determinar las longitudes restantes es posible calcular dos ángulos de la tobera, el ángulo primario de la tobera en la parte convergente y el ángulo secundario de la tobera ubicado en la parte divergente de la tobera. Estos ángulos ejercen una importante influencia en el comportamiento termogasodinámico del flujo dentro de la tobera. En la figura 4 se puede observar dichos ángulos.

Figura 4. Ángulos de una tobera supersónica



Elements of Gas Turbine Propulsion

8.2.4.1 Cálculo del ángulo primario de la tobera (θ)

28) Para realizar una aproximación válida en el cálculo de este ángulo de la tobera, se puede tener en cuenta el coeficiente de flujo (flow coefficient C_D), "este coeficiente es la relación entre el flujo total de aire actual dentro de la tobera y el flujo ideal"[(6)], que de otras maneras se puede expresar como:

[(6)] Ibid 4. p. 805.

$$C_D = \frac{\dot{m}^*}{\dot{m}_i^*} = \frac{A_e^*}{A^*} = \frac{P_t^*}{P_{5t}}$$

Esta relación es una medida del rendimiento de la tobera para flujo uni-direccional, utilizado en los análisis primarios de la tobera. Para la metodología propuesta, es posible tomar los datos de presión total a la entrada y en la garganta, que han sido calculados previamente.

28) Para el ejemplo propuesto se tiene:

$$C_D = \frac{P_t^*}{P_{5t}}$$

$$C_D = \frac{402384.5\ N/m^2}{409989.4\ N/m^2}$$

$$\boxed{C_D = 0.9815}$$

29) Existe una gráfica (figura 5) experimental que proporciona una relación entre el ángulo primario de la tobera y el coeficiente de flujo en la parte convergente de la tobera, con la cual es posible determinar el ángulo requerido:

29) Para el problema planteado, ubicando el valor calculado en la gráfica se tiene:

$$\boxed{\theta = 10°}$$

30) Una vez determinado el coeficiente de flujo, es posible determinar algunos parámetros y correcciones que permitirán tener un cálculo más aproximado de las características de diseño de la tobera. Uno de estos valores es el área efectiva requerida (A_e), la cual representa el área efectiva requerida para flujo uni-dimensional que permitirá pasar el flujo másico actual en la tobera. El área efectiva requerida es determinada desde los cálculos de los ciclos del motor y

el coeficiente del flujo. De esta forma, es posible calcularla a partir de la determinación del coeficiente de flujo.

$$C_D = \frac{\dot{m}^*}{\dot{m}_i^*} = \frac{\rho^* V^* A_e^*}{\rho^* V^* A^*} = \frac{A_e^*}{A^*}$$

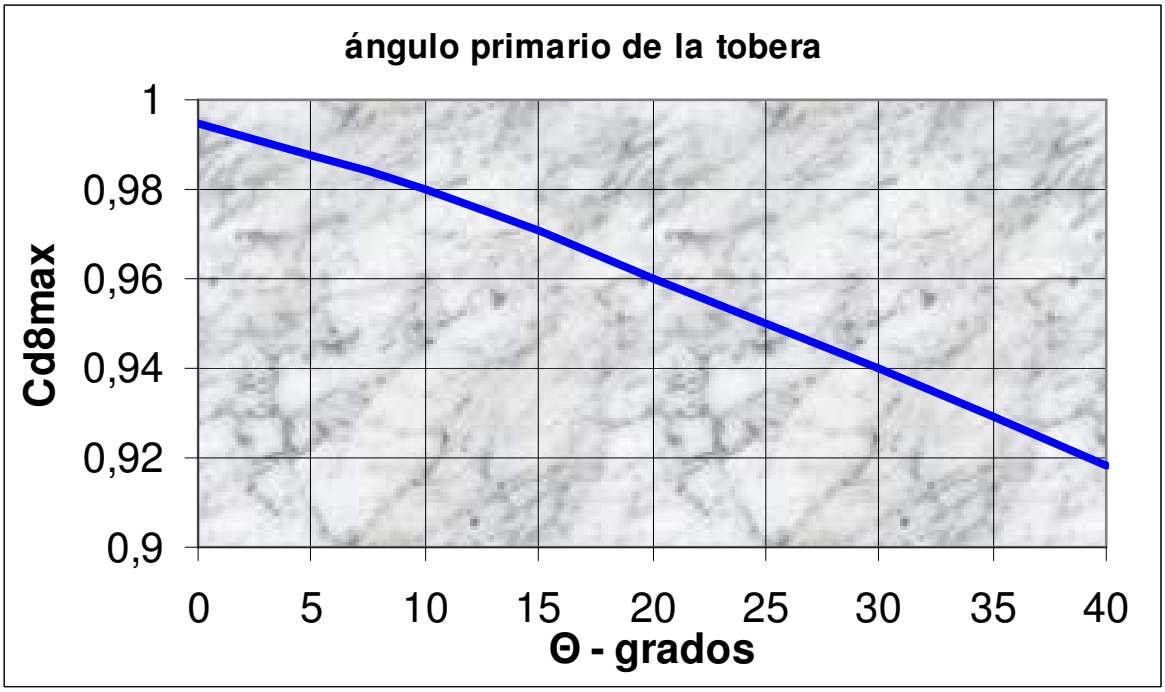
30) Simplificando la ecuación y despejando se obtiene:

$$A_e^* = C_D \bullet A^*$$

$$A_e^* = 0.9815 \bullet 0.3353 m^2$$

$$\boxed{A_e^* = 0.3291 m^2}$$

Figura 5. Gráfica ángulo primario de la tobera en función del coeficiente de flujo vs. Grados de inclinación en la parte convergente



Elements of Gas Turbine Propulsion

31) Realizando el mismo procedimiento anterior es posible calcular el flujo másico actual dentro de la tobera, es decir, el flujo real que está pasando por la garganta de la tobera. Teniendo en cuenta esto con la ecuación general se obtiene:

$$C_D = \frac{\dot{m}^*}{\dot{m}_i^*} = \frac{\rho^* V^* A_e^*}{\rho^* V^* A^*} = \frac{A_e^*}{A^*}$$

31) Para el desarrollo propuesto de la tobera se tiene, con $m^*_i = m_t$

$$C_D = \frac{\dot{m}^*}{\dot{m}_i^*}$$

$$\dot{m}^* = C_D \bullet \dot{m}_i^*$$

$$\dot{m}^* = 0.9815 \bullet 119.993 \, Kg/s$$

$$\boxed{\dot{m}^* = 117.767 \, Kg/s}$$

De esta manera, se han determinado las características geométricas de la parte convergente de la tobera y se han tenido en cuenta las variaciones importantes de flujo másico por causa de pérdidas.

8.2.4.2 Cálculo del ángulo secundario de la tobera (β).

32) En este caso es necesario que se calcule primeramente la relación de áreas entre la salida y la garganta de la tobera ideal, luego observando el coeficiente de velocidad del flujo como se verá más adelante, es posible a través de gráficas experimentales calcular un valor aproximado para el ángulo de la parte divergente de la tobera.

32) Para el ejemplo propuesto se tiene:

$$\boxed{\frac{A_7}{A^*} = 2.867}$$

33) Retomando los cálculos anteriores, se busca el valor ideal de la velocidad a la salida de la tobera, el cual, como se observó en el punto 22, está en función únicamente de las relaciones isentrópicas del aire.

33) De esta forma se tiene para lo propuesto:

$$\boxed{V_{7i} = 1550.629\, m/s}$$

34) Seguidamente se ha de calcular la relación real de áreas, en la que se toma en cuenta el coeficiente de flujo calculado anteriormente y la relación de presiones totales entre la garganta y la salida de la tobera. En este punto es necesario recalcar que se ha asumido que la relación de presiones es igual a 1, esto quiere decir que la presión total es igual en la garganta y en la salida (para efecto de parámetros de diseño), aunque esto solamente es teóricamente, sería importante para cálculos más acertados tomar en cuenta este valor de una forma real. Esta relación de presiones se calcula experimentalmente o por medio de software.

34) Para el ejemplo propuesto se tiene:

$$\boxed{\left(\frac{A_7}{A^*}\right)_r = \frac{P_{7t} \bullet A_7}{P_t^* \bullet C_D \bullet A^*}}$$

Tomando en cuanta la relación de presiones:

$$\left(\frac{P_{7t}}{P_t^*}\right) = 1$$

Despejando y reemplazando:

$$\left(\frac{A_7}{A^*}\right)_r = \frac{(2.867)(1)}{(0.9815)}$$

$$\boxed{\left(\frac{A_7}{A^*}\right)_r = 2.921}$$

35) Seguidamente utilizando esta relación de áreas calculada es necesario referirse ahora al apéndice B, por medio de este, se va a calcular el Número de Mach a la salida real, así como la nueva relación de presiones, de esta forma se tiene:

35) Para el ejercicio se tiene, acorde aproximadamente al apéndice B, para una relación de áreas de 2.921 lo siguiente:

$$\boxed{M_7 = 2.526} \qquad \boxed{\frac{P_7}{P_{7t}} = 0.0566}$$

36) Utilizando la relación de presiones determinada anteriormente se puede calcular la presión estática en la salida.

36) Según lo anterior despejando se tiene:

$$P_7 = 0.0566 \bullet \left(402384.5 \, N/m^2\right)$$

$$\boxed{P_7 = 22774.96 \, N/m^2}$$

37) Ahora se calculará un valor de velocidad a la salida de los gases por medio de una ecuación que relaciona las características de flujo isentrópico y además la relación de presiones estática y total a la salida.

$$V_7 = \sqrt{R \bullet g_c \bullet T_{7t}} \bullet \sqrt{\frac{2 \bullet \gamma}{(\gamma - 1)} \bullet \left[1 - \left(\frac{P_7}{P_{7t}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]}$$

37) Despejando y simplificando se tiene:

$$V_7 = \sqrt{289.3 \frac{N.m}{Kg.°K} \bullet 1.0115 \frac{Kg.m}{N.s^2} \bullet 2000°K} \bullet \sqrt{\frac{2 \bullet 1.33}{(1.33 - 1)} \bullet \left[1 - \left(\frac{22774.96 \, N/m^2}{402384.5 \, N/m^2} \right)^{\frac{1.33 - 1}{1.33}} \right]}$$

$$V_7 = 1540.51 \, m/s$$

38) Con la velocidad calculada anteriormente y con la velocidad ideal que se calculó en el punto 28 se puede calcular un nuevo coeficiente llamado coeficiente de velocidad de flujo (C_V). "Este coeficiente es una relación de medida entre la velocidad actual en la salida de la tobera V_7 y la velocidad ideal de la tobera V_{7i}, correspondiente a $P^*_t = P_{7t}$"[7], este valor representa el efecto de pérdida de la capa límite por la fricción, está en función de la relación de áreas de la garganta, la salida (A_7/A^*) y el ángulo de la parte divergente de la tobera β, así:

$$C_V = \frac{V_7}{V_{7i}}$$

38) Reemplazando y simplificando en la ecuación se obtiene:

$$C_V = \frac{1540.51 \, m/s}{1550.629 \, m/s}$$

$$C_V = 0.9934$$

[7] Ibid 4., p. 808.

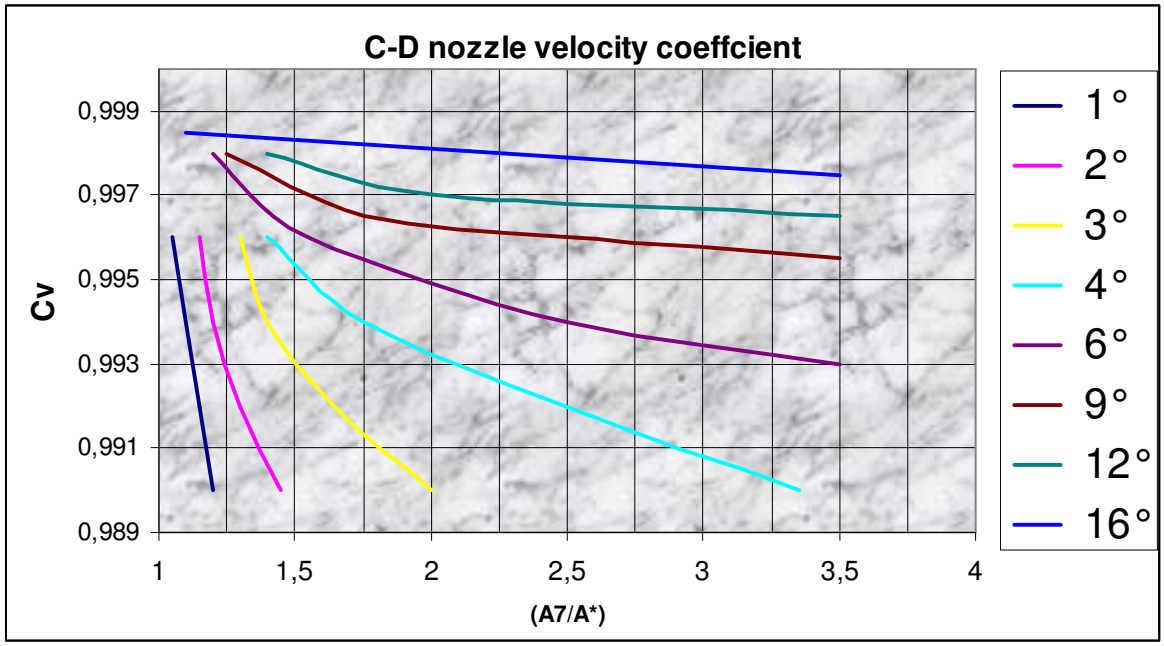
39) Finalmente existe un gráfico que muestra este coeficiente en función del ángulo de divergencia de la tobera β (Figura 6)

39) Para los valores calculados de C_v = 0.9934 y (A_7/A^*) = 2.867 y observando el gráfico 6 se obtiene:

$$\boxed{\beta = 6°}$$

8.2.5 Cálculo del empuje ideal de la tobera en régimen supersónico. Existe una fórmula que permite calcular el empuje que se generaría idealmente con una tobera, esta fórmula dice lo siguiente:

Figura 6. Gráfica de Coeficiente de velocidad de la tobera



Elements of Gas Turbine Propulsion

40) teniendo en cuenta la fórmula general para calcular el empuje en este caso:

$$\boxed{F_{gideal} = \frac{\dot{m}_{8i} \bullet V_s}{g_c}}$$

La velocidad V_s (velocidad de salida del flujo) que esta en función de la presión y temperaturas totales en la garganta, se puede calcular de la siguiente forma:

$$V_s = \sqrt{R \bullet g_c \bullet T_t^*} \bullet \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{P_{9i}}{P_t^*}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

40) Reemplazando por medio de los datos calculados en la tobera propuesta se obtiene:

$$V_s = \sqrt{289.3 \, {}^{N.m}/_{Kg.^o K} \bullet 1.0115 \, {}^{Kg.m}/_{N.s^2} \bullet 2000^o K} \bullet \sqrt{\frac{2 \bullet 1.33}{1.33 - 1}\left[1 - \left(\frac{22700 \, {}^{N}/_{m^2}}{402384.5 \, {}^{N}/_{m^2}}\right)^{\frac{1.33-1}{1.33}}\right]}$$

$$V_s = \sqrt{585253.9 \, {}^{m^2}/_{s^2}} \bullet \sqrt{\frac{2.66}{0.33}\left[1 - (0.4899967)\right]}$$

$$\boxed{V_s = 1551.11 \, {}^{m}/_{s}}$$

De esta forma reemplazando en la ecuación de empuje:

$$F_{gideal} = \frac{119.993 \, {}^{Kg}/_{s} \bullet 1551.11 \, {}^{m}/_{s}}{1.0115 \, {}^{Kg.m}/_{N.s^2}}$$

$$\boxed{F_{gideal} = 184006.2N}$$

8.2.6 Características Operativas de la Tobera supersónica.

41) Existe una manera útil de estudiar el comportamiento de una tobera luego de que se ha diseñado, con respecto a la variación de flujo másico y distribución de presiones a través de la misma, es posible investigar cuales son

las relaciones ideales utilizando una simple ecuación tomada de la referencia 1., esta ecuación relaciona las presiones y el flujo másico, por medio de las ecuaciones de gases ideales, energía y entropía cada uno teniendo en cuenta que el flujo es isentrópico, de lo que se obtiene:

Masa:

$$\dot{m} = \frac{PAV}{RT}$$

Energía:

$$T_t = T + \frac{V^2}{2 c_p g_c}$$

Entropía:

$$P = P_t \left(\frac{T}{T_t} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

Despejando en la primera:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{PV}{RT}$$

Teniendo en cuenta que:

$$P = P_t \left(\frac{P}{P_t} \right) \qquad T = T_t \left(\frac{T}{T_t} \right)$$

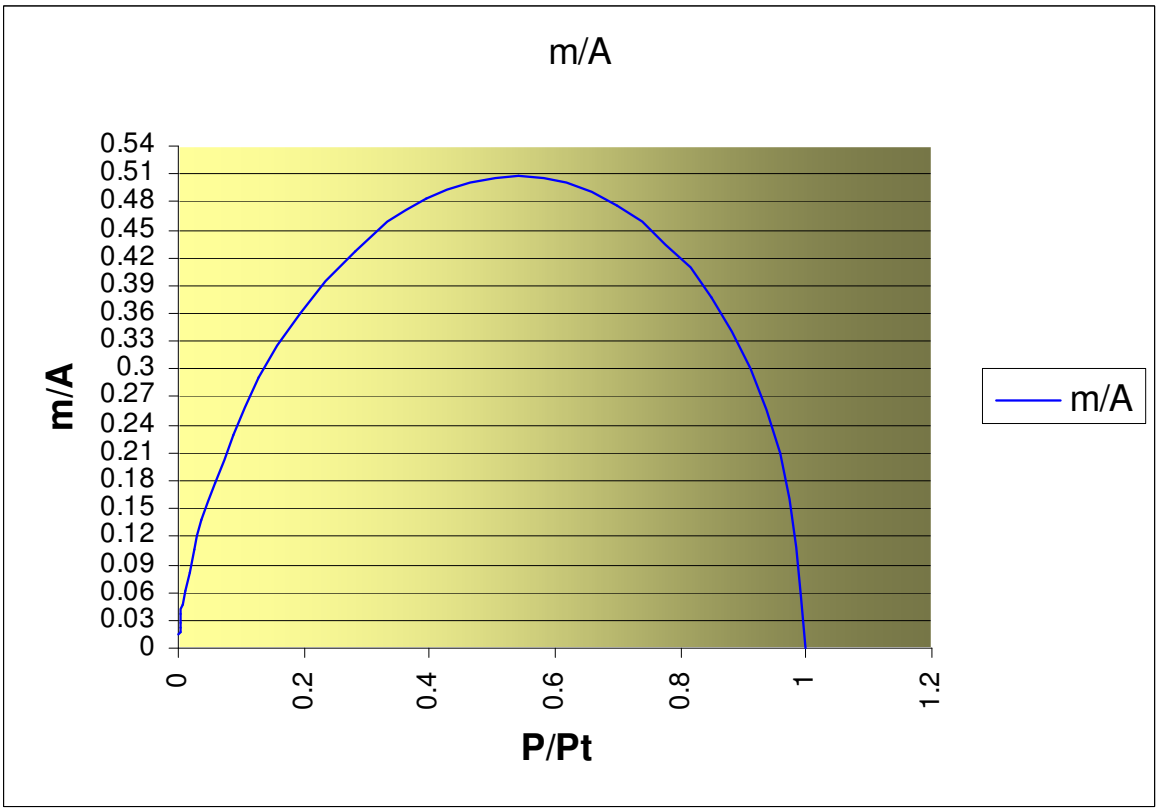
$$V = \sqrt{2c_p g_c (T_t - T)} = \sqrt{2c_p g_c T_t \left[1 - \left(\frac{P}{P_t}\right)^{\gamma-1/\gamma}\right]}$$

Finalmente simplificando:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{P_t}{\sqrt{T_t}} \bullet \sqrt{\frac{2g_c}{R}\frac{\gamma}{\gamma-1}\left[\left(\frac{P}{P_t}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P}{P_t}\right)^{(\gamma+1)/\gamma}\right]}$$

41) Para este caso se tendrá un comportamiento característico de la tobera representado en la figura 7.

Figura 7. Gráfica de las características operativas de la tobera supersónica



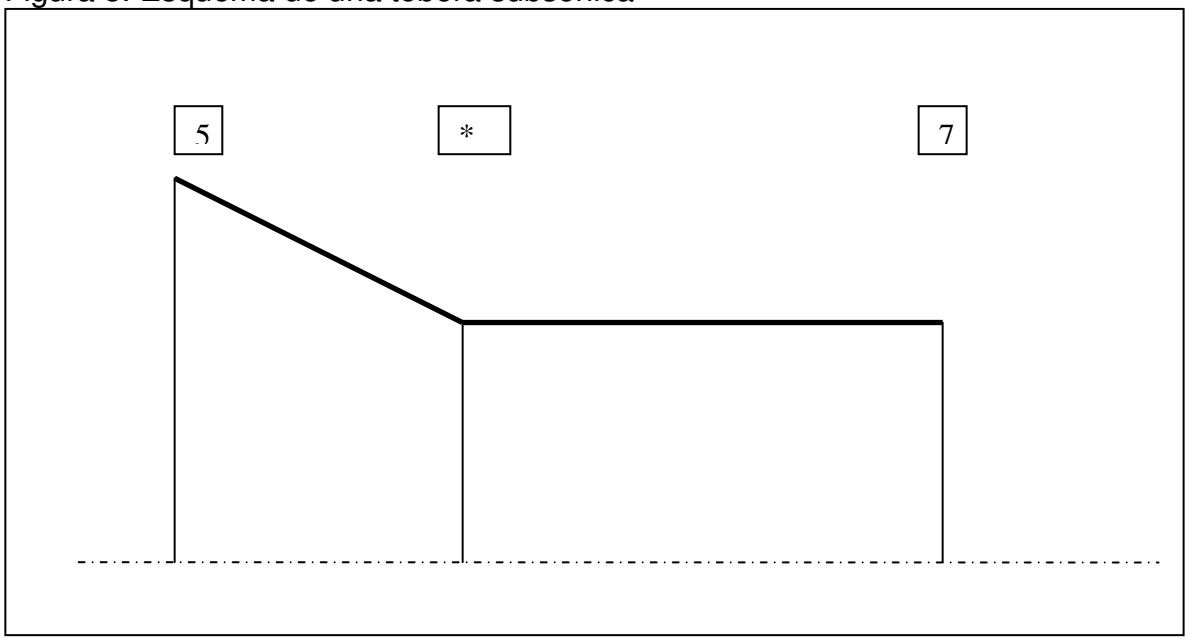
Diseño del autor

8.3 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS INICIALES PARA FLUJO SUBSONICO

El análisis del flujo en condiciones subsónicas es importante ya que se conocerá el comportamiento del flujo a través de las diferentes estaciones de la tobera, y se podrá tener una noción de como podrá el efecto de vectorización afectar el comportamiento estable de la tobera para este régimen.

8.3.1. Datos iniciales de entrada para flujo subsónico. El procedimiento aplicado para el cálculo termogasodinámico de la tobera es el mismo que en el cálculo de la tobera supersónica, asumiendo la misma área de entrada de los gases, y variando algunos factores para que la tobera se diseñada en el régimen subsónico (ver figura 8).

Figura 8. Esquema de una tobera subsónica



Diseño del autor

42) Temperatura de entrada.

$$\boxed{T_{5t} = 700°K}$$

Esta temperatura inicial o temperatura de entrada a la tobera se ha tomado analíticamente teniendo como base los parámetros de entrada en la tobera en condiciones supersónicas, llegando a la conclusión que la temperatura en régimen supersónico es el 100% dado que el motor trabaja al máximo, por ende para condiciones subsónicos el motor se encuentra reducido en cuanto a su trabajo y temperatura en un 40%-60% menos de trabajo, en este punto es necesario tener en cuenta que el motor para el que se está diseñando este componente es de post-quemador de flujo mixto, con las siguientes características (los porcentajes de reducción exclusivamente dependerán del motor utilizado para cualquier caso):

- El motor trabaja con flujo secundario, este flujo se mezcla con el aire primario en el post-quemador, lo cual reducirá en condiciones de operación subsónicas la temperatura de entrada en la tobera en una enorme proporción.

- El gas que sale de las cámaras de combustión, pierda calor al transmitir su energía a la turbina para producir la potencia necesaria para mover el compresor lo cual disminuye la temperatura del gas a la entrada de la tobera.

- Por la geometría del post-quemador el gas se expandirá en una pequeña proporción, lo cual disminuirá en otra medida la temperatura del gas[8].

43) Velocidad de entrada.

Al igual que en el caso de la temperatura, el perfil de velocidad será reducido de la misma manera, trabajando en condiciones de operación de un 67% con respecto a la velocidad del flujo en el caso supersónico.

$$\boxed{V_5 = 245.93 \, m/s}$$

44) Flujo másico.

[8] Ibid 4., p 417.

De la misma forma el flujo másico disminuye de una forma radical, al no estar en funcionamiento el post-quemador, lo cual lo reducirá en una enorme proporción para el caso propuesto en particular se puede observar:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{5\,i} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}$$

$$m_{aire} = 46.7\frac{Lb}{s}$$

$$m_{fuel} = 3.338\frac{lb}{s}$$

$$m_i = 46.7\frac{lb}{s} + 3.338\frac{lb}{s}$$

$$\boxed{m_i = 50.038\frac{lb}{s}}$$

8.3.2 Análisis a la entrada de la tobera.

45) Ahora se calculará la temperatura estática de entrada a la tobera

$$\boxed{T_{5t} = T_5 + \frac{V_5^{\,2}}{2 \bullet g_c \bullet Cp}}$$

45) Para el ejercicio propuesto despejando:

$$700°K = T_5 + \frac{\left(245.93 \, m/s\right)^2}{2 \bullet 1.0115\frac{Kg.m}{N.s^2} \bullet 0.28\frac{Kcal}{Kg.°K} \bullet 4186\frac{N.m}{1Kcal}}$$

$$\boxed{T_5 = 674.49°K}$$

46) Sabiendo ya la temperatura estática en la entrada se puede determinar el Número de Mach en ese punto.

$$M_5 = \frac{V_5}{a_5}$$

Donde:

$$a_5 = \sqrt{\gamma \bullet R \bullet g_c \bullet T_5}$$

46) Así, para el caso del ejemplo despejando:

$$M_5 = \frac{245.93\,{}^{m}\!/\!_{s}}{\sqrt{1.33 \bullet 289.3\,{}^{N.m}\!/\!_{Kg.°K} \bullet 1.0115\,{}^{Kg.m}\!/\!_{N.s^2} \bullet 674.49°K}}$$

$$M_5 = \frac{245.93\,{}^{m}\!/\!_{s}}{512.35\,{}^{m}\!/\!_{s}}$$

$$M_5 = 0.48$$

47) Acorde a estos resultados y teniendo en cuenta las fórmulas para flujo compresible, que se pueden observar en el apéndice B de este proyecto, para flujo de aire luego del proceso de combustión (γ = 1.33), es posible obtener los siguientes valores para el Número de Mach calculado en la entrada de la tobera:

$$\frac{T_5}{T_{5t}}; \frac{\rho_5}{\rho_{5t}}; \frac{P_5}{P_{5t}}; \frac{A_5}{A^*}; MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}};$$

47) Para el ejercicio se obtiene lo siguiente:

$$\frac{T_5}{T_{5t}} = 0.963376 \qquad \frac{\rho_5}{\rho_{5t}} = 0.893093 \qquad \frac{A_5}{A^*} = 1.38616$$

$$\frac{P_5}{P_{5t}} = 0.860385 \qquad MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}} = 0.485246$$

48) Tomando la ecuación del MFP, despejando la presión total en la estación 5.

$$MFP = \frac{\dot{m}_{5i} \bullet \sqrt{T_{5t}}}{P_{5t} \bullet A_5}$$

$$P_{5t} = \frac{\dot{m}_{5i} \bullet \sqrt{T_{5t}} \bullet \sqrt{\frac{R}{g_c}}}{A_5 \bullet MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}}}$$

48) Para el ejercicio que se está desarrollando se tiene:

$$P_{5t} = \frac{50.038\,{Kg}/{s} \bullet \sqrt{700°K} \bullet 16.9115\,\frac{N.s}{Kg.\sqrt{°K}}}{0.5057m^2 \bullet 0.485246}$$

$$P_{5t} = \frac{50.038\,{Kg}/{s} \bullet 447.43\,{N.s}/{Kg}}{0.24538m^2}$$

$$P_{5t} = 91240.12\,{N}/{m^2}$$

49) Con la ley de la conservación de la masa se puede obtener la densidad en este punto, para así poder hallar la presión estática en la estación 5.

$$\dot{m}_{5i} = \rho_5 \bullet A_5 \bullet V_5$$

49) Despejando la densidad y calculando para el ejemplo:

$$\rho_5 = \frac{\dot{m}_{5i}}{A_5 \bullet V_5}$$

$$\rho_5 = \frac{50.038\, Kg/s}{0.5057 m^2 \bullet 245.93\, m/s}$$

$$\rho_5 = 0.40234\, Kg/m^3$$

50) Ahora se puede calcular la presión estática en el punto 5 de la tobera, utilizando la ecuación:

$$P_{5t} = P_5 + \frac{\rho_5 (V_5)^2}{2 \bullet g_c}$$

50) Para el problema propuesto despejando la presión estática de la ecuación se tiene:

$$P_5 = P_{5t} - \frac{\rho_5 (V_5)^2}{2\, g_c}$$

$$P_5 = 91240.12\, N/m^2 - \frac{0.40234\, Kg/m^3 \bullet (245.93\, m/s)^2}{2 \bullet 1.0115 \frac{Kg.m}{N.s^2}}$$

$$P_5 = 79211.374\, N/m^2$$

8.3.3 Análisis en la garganta de la tobera.

51) Retomando la relación de áreas hallada anteriormente, es muy sencillo hallar el área de la garganta ya que se conoce el área de entrada.

$$\frac{A_5}{A^*} = 1.38616$$

$$\boxed{\frac{A_5}{A^*} = \frac{A_5}{A^*}}$$

51) Reemplazando y despejando en el ejercicio se tiene:

$$A^* = \frac{A_5}{A_5 / A^*}$$

$$A^* = \frac{0.5057 m^2}{(1.38616)}$$

$$\boxed{A^* = 0.3648 m^2}$$

52) Para continuar con el cálculo se debe asumir que el Número de Mach en la garganta va a ser igual a la unidad. M=1; estas es una condición de diseño para cualquier tobera en la estación de la garganta. A continuación se busca en el apéndice B este valor, con el fin de hallar las relaciones para flujo compresible correspondientes y continuar con el cálculo de los parámetros.

52) De esta manera para un Número de mach igual a uno observando en el apéndice B se deduce:

$$\frac{T^*}{Tt^*} = 0.858369 \qquad \frac{\rho^*}{\rho t^*} = 0.629524 \qquad MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}} = 0.672628$$

$$\frac{P^*}{Pt^*} = 0.540364 \qquad \frac{A^*}{A^*} = 1$$

53) Teniendo en cuenta la tercera ley termodinámica para flujo isentrópico, la temperatura total se asume constante durante todas las estaciones de la tobera.

$$Tt = Tt^* = T_{5t} = T_{7t}$$

53) Esto es para lo asumido:

$$T_t = T_t^* = T_{5t} = T_{7t} = 700°K$$

54) Partiendo de esto, el siguiente paso es medir la temperatura estática en la garganta por medio de las relaciones de flujo compresible,

$$\frac{T^*}{Tt^*} = 0.858369$$

54) Donde reemplazando y calculando en el ejercicio se tiene:

$$T^* = 0.858369 \bullet 700°K$$

$$T^* = 600.85°K$$

55) Conociendo la temperatura total, se calcula la velocidad local y la velocidad del flujo.

$$M^* = \frac{V^*}{a^*}$$

Donde:

$$a^* = \sqrt{\gamma \bullet R \bullet g_c \bullet T^*}$$

55) para el ejercicio se tiene que el M = 1, lo cual genera:

$$1 = \frac{V^*}{a^*} = M^*$$

Calculando la velocidad local del sonido en la garganta se obtiene:

$$a^* = \sqrt{1.33 \bullet 289.3 \, {}^{N.m}\!/_{Kg.°K} \bullet 1.0115 \, {}^{Kg.m}\!/_{N.s^2} \bullet 600.85°K}$$

$$\boxed{a^* = 483.57 \, {}^{m}\!/_{s} = V^*}$$

56) Con estos datos calculados es posible hallar la densidad en la sección de la garganta, utilizando la ley de la conservación de la masa.

$$\boxed{\dot{m}^* = \rho^* \bullet A^* \bullet V^* = m_{5i} = \dot{m}_{7i}}$$

56) Despejando la densidad y calculando para la tobera:

$$\rho^* = \frac{\dot{m}^*}{A^* \bullet V^*}$$

$$\rho^* = \frac{50.038 \, {}^{Kg}\!/_{s}}{0.3648 m^2 \bullet 483.57 \, {}^{m}\!/_{s}}$$

$$\boxed{\rho^* = 0.2836 \, {}^{Kg}\!/_{m^3}}$$

57) El siguiente paso es calcular la presión total en la garganta, esto se hace por medio de la ecuación de "***mass flow parameter***" MFP:

$$P^*_t = \frac{\dot{m}_i^* \bullet \sqrt{T_t^*} \bullet \sqrt{\frac{R}{g_c}}}{A^* \bullet MFP \sqrt{\frac{R}{g_c}}}$$

57) Para el ejemplo propuesto se tiene:

$$P_t^* = \frac{50.038 \, Kg/s \bullet \sqrt{700°K} \bullet 16.9115 \frac{N.m}{Kg.\sqrt{°K}}}{0.3648 m^2 \bullet 0.672628}$$

$$P_t^* = \frac{50.038 \, Kg/s \bullet 447.43 \frac{N.m}{Kg}}{0.2453 m^2}$$

$$\boxed{P_t^* = 91269 \, .8 \, N/m^2}$$

58) Con el valor de la presión total ahora es posible calcular la presión estática en la garganta, por medio de la relación de flujo compresible tomada anteriormente:

$$\frac{P^*}{Pt^*} = 0.540364$$

58) Despejando se obtiene el valor de presión estática:

$$P^* = 0.540364 \bullet 91269 \, .8 \, N/m^2$$

$$\boxed{P^* = 49318.91 \, N/m^2}$$

8.3.4 Análisis de la sección de salida. Como la tobera en condiciones subsónicas funciona únicamente en posición convergente es necesario tener

en cuenta la influencia del componente divergente, que para este caso estará completamente recto (el área de la garganta es igual al área de salida).

Para evitar la caída del empuje, en condiciones de diseño generales, no se asume pérdidas por la longitud de este conducto. Realizando un estudio más específico como se verá a continuación, se observará las características de funcionamiento del tubo, a medida que este pasa desde la garganta hasta la salida y se observarán las diferentes pérdidas que influenciarán la caída en su rendimiento.

59) Se asume para cuestiones de cálculos que la presión de salida es igual a la presión estática a la altitud de diseño.

$$P_{atm} = P_7$$

59) En este caso:

$$P_{atm} = P_7 = 22700 \, {}^{N}\!/_{m^2}$$

60) Hasta el punto anterior no se conoce si la tobera, se esta comportando dentro de los parámetros o rangos, en donde se pueda establecer el rendimiento de la tobera y por ende conocer si esta operando correctamente. Para determinar si esta tobera, teóricamente esta operando adecuadamente se tiene una relación matemática que dice:

$$\frac{P_{T^*}}{P_{ATM}} \leq 4$$

60) Para este caso se tiene:

$$\frac{P_{T^*}}{P_{ATM}} = \frac{91269.8 \, {}^{N}\!/_{m^2}}{22700 \, {}^{N}\!/_{m^2}} = 4$$

Esto quiere decir que la tobera se encuentra operando sobre el rango de trabajo y funcionamiento establecidos teóricamente, esto puede inferirse ya que en esta primera aproximación, no se han tenido en cuenta las pérdidas que por causa de la longitud del tubo recto y la fricción del fluido se generen, con lo cual se disminuye el valor real de las presiones internas en la tobera.

Aunque por el análisis propuesto se deduce que la tobera no está expandiendo completamente el aire hasta la presión estática del ambiente, es recomendado por la referencia anteriormente nombrada, que se utilice una tobera convergente (para flujo subsónico) que cumpla esta relación de presiones ya sea igual o menor a 4, en condiciones ideales se sugiere que se diseñe con el fin que la expansión sea completa.

El análisis del flujo en condiciones subsónicas es importante ya que se conocerá el comportamiento del flujo a través de las diferentes estaciones de la tobera, y se podrá tener una idea inicial de como podrá el efecto de vectorización afectar el comportamiento estable de la tobera para este régimen.

8.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA TOBERA.

Una vez determinados los ángulos correspondientes de la tobera, es necesario calcular las longitudes respectivas de la parte convergente y la parte divergente de la misma. Esto se hace a través de un sencillo procedimiento utilizando las relaciones trigonométricas que nos permiten calcular longitudes en función de los ángulos.

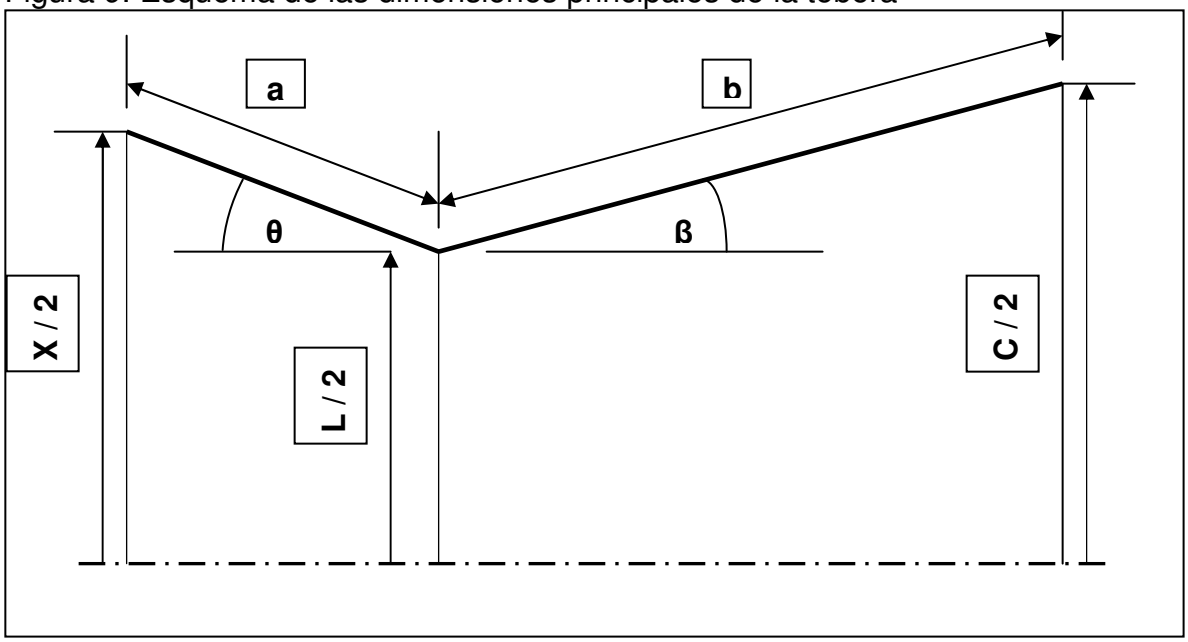
En esta parte es necesario recordar el capítulo 1.2.2 parte 5, en la que se definió un área de entrada de sección cuadrada, con el fin de permitir una construcción más sencilla de la tobera; pero, es necesario redondear las esquinas mediante el procedimiento siguiente, en el que se plantea una ecuación por medio de la cual se obtendrán las dimensiones máximas de radio y longitud en función del área de entrada en la tobera y en función del área mínima de la misma, que en este caso se refiere al área de la garganta en condiciones supersónicas (en este caso se observó por el procedimiento anterior que el área de la garganta es menor en el caso subsónico), esto es necesario por la siguientes razones:

- La distribución de presiones a lo largo de una tobera, es muy diferente en una tobera de sección transversal cuadrada que en una de sección transversal

circular; la mayoría de las toberas diseñadas en la actualidad son circulares y los cálculos con los que se calculan varían en gran proporción con respecto a los de una tobera de sección completamente cuadrada.

- Las características de operación del flujo y la forma cuadrada de la tobera, generará concentradores de esfuerzos en las esquinas, lo que disminuirá la eficiencia del diseño de la tobera y podrá producir fallas durante el trabajo normal de la misma.

Figura 9. Esquema de las dimensiones principales de la tobera



Diseño del autor

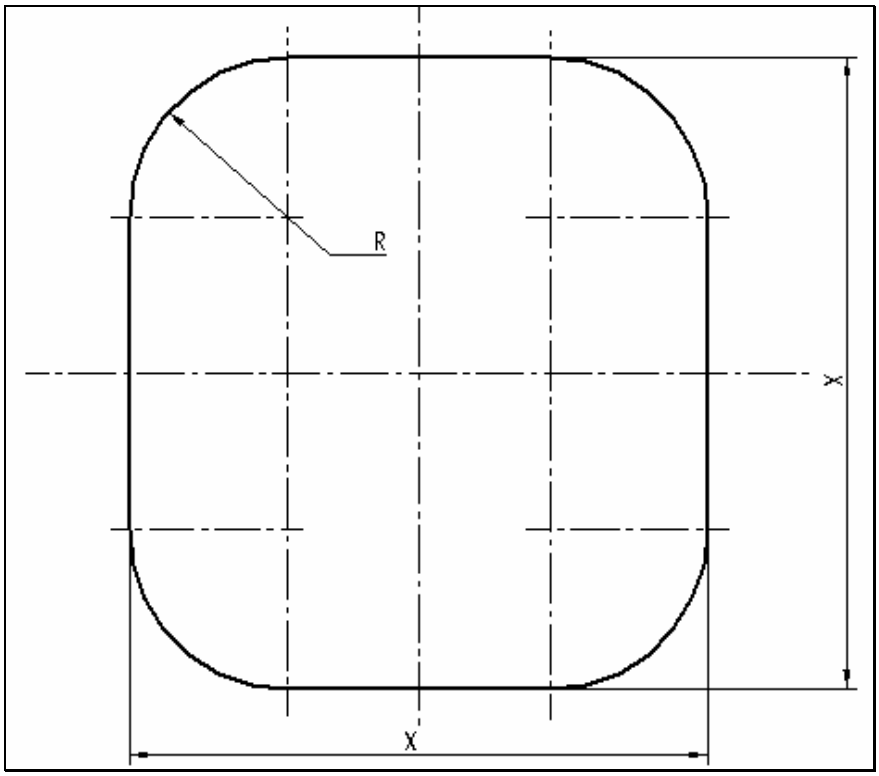
Por estas razones, a continuación se realizará el redondeo más adecuado de las esquinas, para obtener unos cálculos más aproximados a las condiciones de operación normal.

8.4.1 Redondeo de las esquinas de la sección transversal de la tobera. Para comenzar el análisis se debe tener en cuenta la figura 9. También será necesario tener en cuenta las siguientes condiciones para realizar un efectivo diseño de los bordes redondeados de las paredes de la tobera:

1) La longitud del lado transversal de la tobera será asumida constante a lo largo de la misma y tendrá un valor X, además, el radio R de redondeo de las esquinas que se calculará será constante también, con lo cuál, la variación de área se hará exclusivamente en sentido vertical, es decir, variando las longitudes (L y C) de las áreas variables, en este caso el área de la garganta y el área de salida. Esto permitirá la simplificación del diseño del mecanismo y la forma de movimiento para los requerimientos de vectorización que serán evaluados más adelante.

2) El área de entrada será simétrica en todas sus direcciones, con lo cual, se permitirá tener un mejor acople de la tobera con el resto del motor. Como se dijo antes, el radio de curvatura R será igual a lo largo de todo el motor, a continuación se esquematiza las dimensiones del área de entrada (figura 10).

Figura 10. Esquema de las dimensiones de la sección transversal de entrada en la tobera

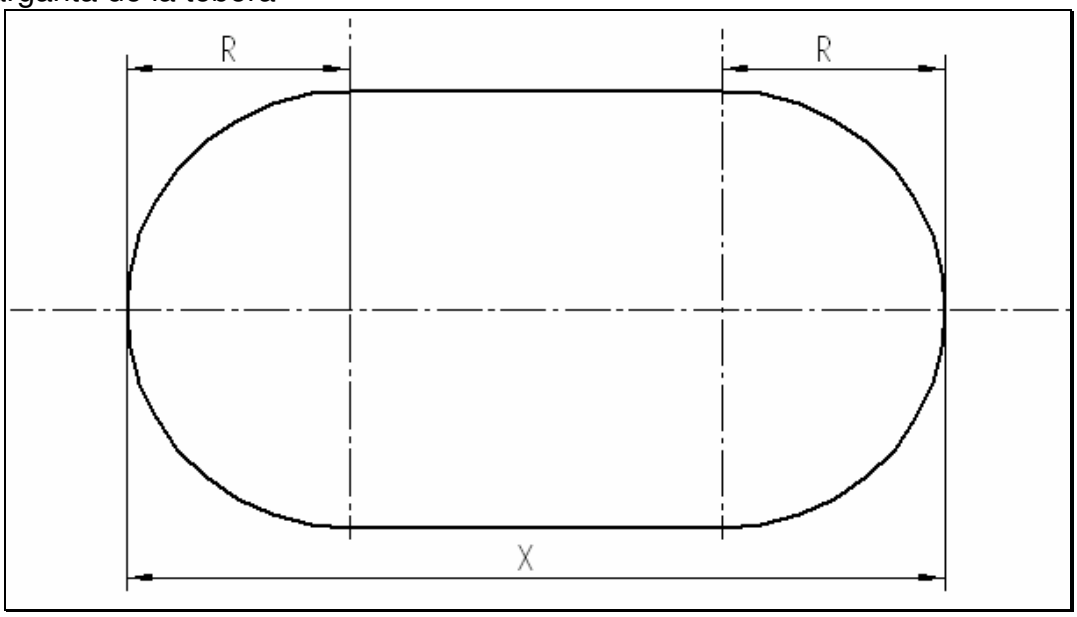


Diseño del autor

3) El radio R, además de cumplir con la condición anterior, también tendrá que tener en cuenta el área mínima que se encuentre en la

operación de la tobera, en este caso, el área de la garganta en condiciones supersónicas (asumiendo mínima posición de operación), por esta razón, el radio R también tendrá que ser equivalente para que genere el área mínima requerida como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Esquema de las dimensiones de la sección transversal mínima de garganta de la tobera



Diseño del autor

8.4.2 Ecuación para redondeo de las esquinas.

61) De acuerdo a lo planteado anteriormente se puede deducir las ecuaciones de las áreas para las 2 secciones, la entrada y la garganta, con esto se obtiene:

Para el área de la garganta se tiene la siguiente ecuación:

$$A^* = \pi \bullet R^2 + 2 \bullet R \bullet (X - 2R)$$

Simplificando la ecuación se obtiene:

$$A^* = \pi R^2 + 2RX - 4R^2$$

$$\mathbf{1}\ \boxed{A^* = (\pi - 4)R^2 + 2RX}$$

Para el área de entrada se tiene lo siguiente:

$$A_5 = (\pi - 4)R^2 + 2RX + X \bullet (X - 2R)$$

Simplificando se obtiene:

$$A_5 = (\pi - 4)R^2 + 2RX + X^2 - 2RX$$

$$\mathbf{2}\ \boxed{A_5 = (\pi - 4)R^2 + X^2}$$

Ahora para encontrar los puntos comunes en las ecuaciones, se despeja una de ellas y se reemplaza en la otra, en este caso se despejará la variable X de la ecuación 1, así:

$$2RX = A^* - (\pi - 4)R^2$$

$$\boxed{X = \frac{\left(A^* - (\pi - 4)R^2\right)}{2R}}$$

Reemplazando X en la ecuación 2 se obtiene:

$$A_5 = (\pi - 4)R^2 + \left(\frac{A^* - (\pi - 4)R^2}{2R}\right)^2$$

Despejando y simplificando se tiene.

$$A_5 = (\pi - 4)R^2 + \frac{\left(\left(A^* - (\pi - 4)R^2\right)\right)^2}{4R^2}$$

$$4R^2A_5 = 4(\pi-4)R^4 + (A^{*^2} - 2A^*(\pi-4)R^2 + (\pi-4)^2R^4)$$

$$4(\pi-4)R^4 + A^{*^2} - 2A^*(\pi-4)R^2 + (\pi-4)^2R^4 - 4R^2A_5 = 0$$

$$4(\pi-4)R^4 + (\pi-4)^2R^4 - 2A^*(\pi-4)R^2 - 4A_5R^2 + A^{*^2} = 0$$

$$(4\pi-16)R^4 + (\pi^2-8\pi+16)R^4 - 2A^*(\pi-4)R^2 - 4A_5R^2 + A^{*^2} = 0$$

Simplificando se obtiene una ecuación de grado 4 con solución cuadrática, con la cual se conseguirán cuatro respuestas:

$$(4\pi-16+\pi^2-8\pi+16)R^4 - (2A^*(\pi-4)+4A_5)R^2 + A^{*^2} = 0$$

$$\boxed{(\pi^2-4\pi)R^4 - (2A^*(\pi-4)+4A_5)R^2 + A^{*^2} = 0}$$

La forma general de la ecuación cuadrática es la siguiente:

Para una ecuación de la forma:

$$\boxed{ax^2+bx+c=0}$$

Se tiene:

$$\boxed{x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}}$$

Despejando para el caso propuesto y factorizando se obtiene:

- $a = (\pi^2 - 4\pi)$

- $b = -\left(2A^*(\pi - 4) + 4A_5\right)$

- $c = A^{*2}$

$$R^2 = \frac{-\left(-\left(2A^*(\pi-4)+4A_5\right)\right) \pm \sqrt{\left(-\left(2A^*(\pi-4)+4A_5\right)\right)^2 - 4\left(\pi^2-4\pi\right)\left(A^{*2}\right)}}{2\left(\pi^2-4\pi\right)}$$

$$R^2 = \frac{\left(2A^*(\pi-4)+4A_5\right) \pm \sqrt{\left(2A^*(\pi-4)+4A_5\right)^2 - 4\left(\pi^2-\pi\right)\left(A^{*2}\right)}}{2\left(\pi^2-\pi\right)}$$

$$\boxed{R = \pm\sqrt{\frac{\left(2A^*(\pi-4)+4A_5\right) \pm \sqrt{\left(2A^*(\pi-4)+4A_5\right)^2 - 4\left(\pi^2-\pi\right)\left(A^{*2}\right)}}{2\left(\pi^2-\pi\right)}}}$$

Con esta ecuación es posible calcular las dimensiones máximas con las cuales se cumplirán los requerimientos exigidos anteriormente, luego de calcular R y observar cual es el valor real más adecuado de los cuatro valores resultantes, se puede calcular la longitud del lado X, reemplazando en la siguiente que fue calculada anteriormente:

$$\boxed{X = \frac{\left(A^* - (\pi-4)R^2\right)}{2R}}$$

61) Para el ejercicio que se ha propuesto como ejemplo se tiene lo siguiente:

El área de entrada y el área de la garganta según las condiciones de diseño requeridas anteriormente respectivamente son:

$$\boxed{A_5 = 0.5057m^2}$$

$$\boxed{A^* = 0.3353m^2}$$

Reemplazando en la ecuación anterior para calcular el radio:

$$R = \pm\sqrt{\frac{\left(2(0.3353m^2)(\pi-4)+4(0.5057m^2)\right) \pm \sqrt{\left(2(0.3353m^2)(\pi-4)+4(0.5057m^2)\right)^2 - 4(\pi^2-\pi)(0.3353m^2)^2}}{2(\pi^2-\pi)}}$$

Y calculando, se obtienen:

1) Dos raíces imaginarias:

$$\boxed{R_1 = \pm\sqrt{-0.6055m^2}}$$

2) Un resultado negativo y otro positivo o real, el cual es la respuesta:

$$\boxed{R_2 = \pm\sqrt{0.0689m^2}}$$

Tomando el valor real de este radical se calcula el radio de curvatura R para los bordes de la tobera:

$$\boxed{R = 0.2624\ \ m}$$

Ahora reemplazando en la siguiente ecuación y calculando, se obtiene el valor de X, así:

$$X = \frac{(0.3353m^2 - (\pi-4)(0.2624m)^2)}{2(0.2624m^2)}$$

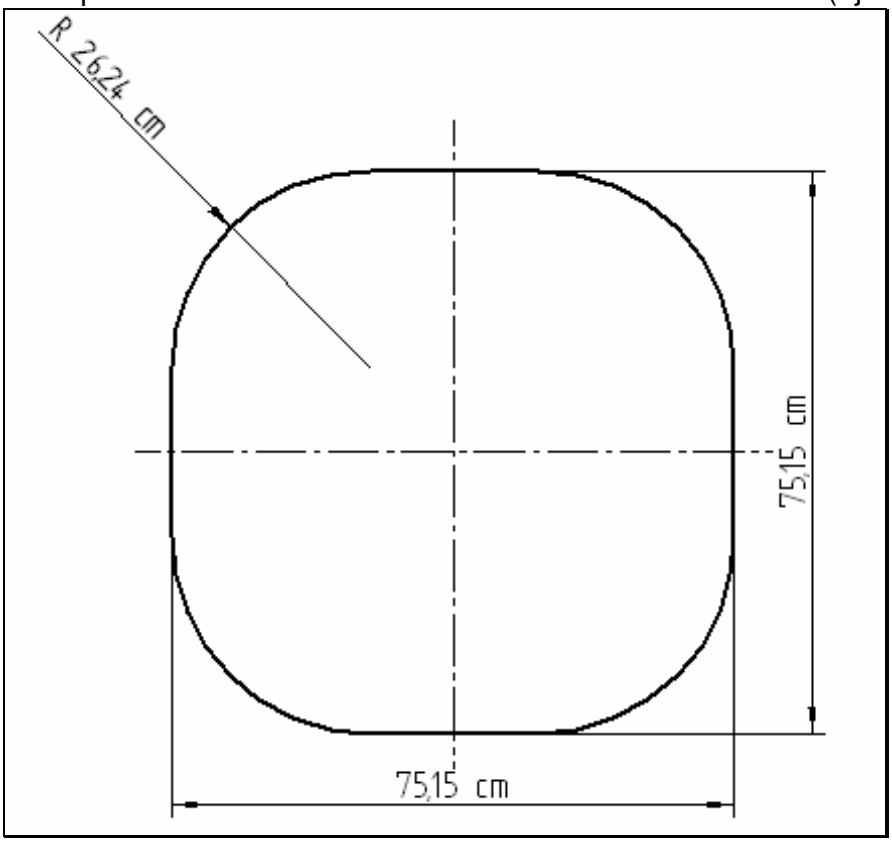
$$\boxed{X = 0.7515m}$$

62) Ahora con esto calculado es posible hacer el esquema del área con sus dimensiones reales.

62) Según lo obtenido anteriormente se tiene la figura 12.

8.4.3 Dimensiones finales. Luego de tener las correcciones correspondientes a la forma transversal del área y los valores correspondientes a las áreas y los ángulos de la tobera en su máximo régimen (supersónico), es posible hacer una aproximación para desarrollar la geometría longitudinal que la tobera va a tener.

Figura 12. Esquema Dimensiones de área de entrada en la tobera (ejemplo)



Diseño del autor

63) Para hacer lo anteriormente dicho, se van a tomar las diferentes áreas en las estaciones de la tobera para el régimen en que se está trabajando, además de la longitud del lado X y el radio de curvatura, calculados previamente.

63) Para continuar con el ejemplo se tiene remitiéndose al cálculo de las áreas en régimen supersónico:

$$\boxed{A_5 = 0.5057\, m^2}$$

$$\boxed{A^* = 0.3353 m^2}$$

$$\boxed{A_7 = 0.9646 m^2}$$

$$\boxed{X = 0.7515 m}$$

$$\boxed{R = 0.2624 m}$$

64) Seguidamente es posible calcular el valor de la longitud en la garganta (L), se conoce el área de la garganta (A*), la cual se puede tomar asumiendo el valor ideal de esta área, calculado previamente en el punto 8. Por medio de esto es posible calcular la longitud de la parte convergente de la tobera utilizando luego una sencilla ecuación trigonométrica.

Como se observó en la gráfica 11 de la garganta el valor del lado L corresponde en la garganta a 2 veces el valor calculado del radio R, así:

$$\boxed{L = 2R}$$

64) Para el caso propuesto con el área A* calculada en el punto 8 y despejando se obtiene:

$$L = 2 \bullet 0.2624 m$$

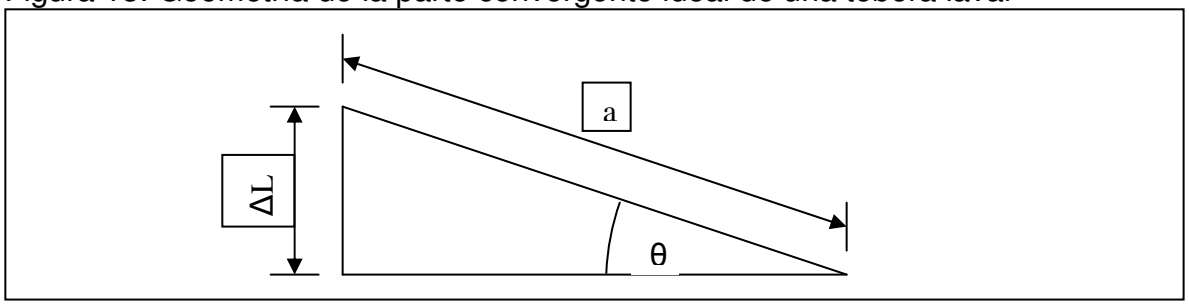
$$\boxed{L = 0.5248 m}$$

Donde para la figura 13 se tiene:

$$\boxed{\Delta L = \frac{x - L}{2}}$$

$$\boxed{sen\theta = \frac{\Delta L}{a}}$$

Figura 13. Geometría de la parte convergente ideal de una tobera laval



Diseño del autor

65) Para el ejercicio reemplazando y simplificando se obtiene:

$$\Delta L = \frac{0.7515m - 0.5248m}{2}$$

$$\boxed{\Delta L = 0.11335m}$$

Despejando en la ecuación del seno el lado a se obtiene:

$$a = \frac{\Delta L}{sen\theta}$$

$$a = \frac{0.11335m}{sen(10°)}$$

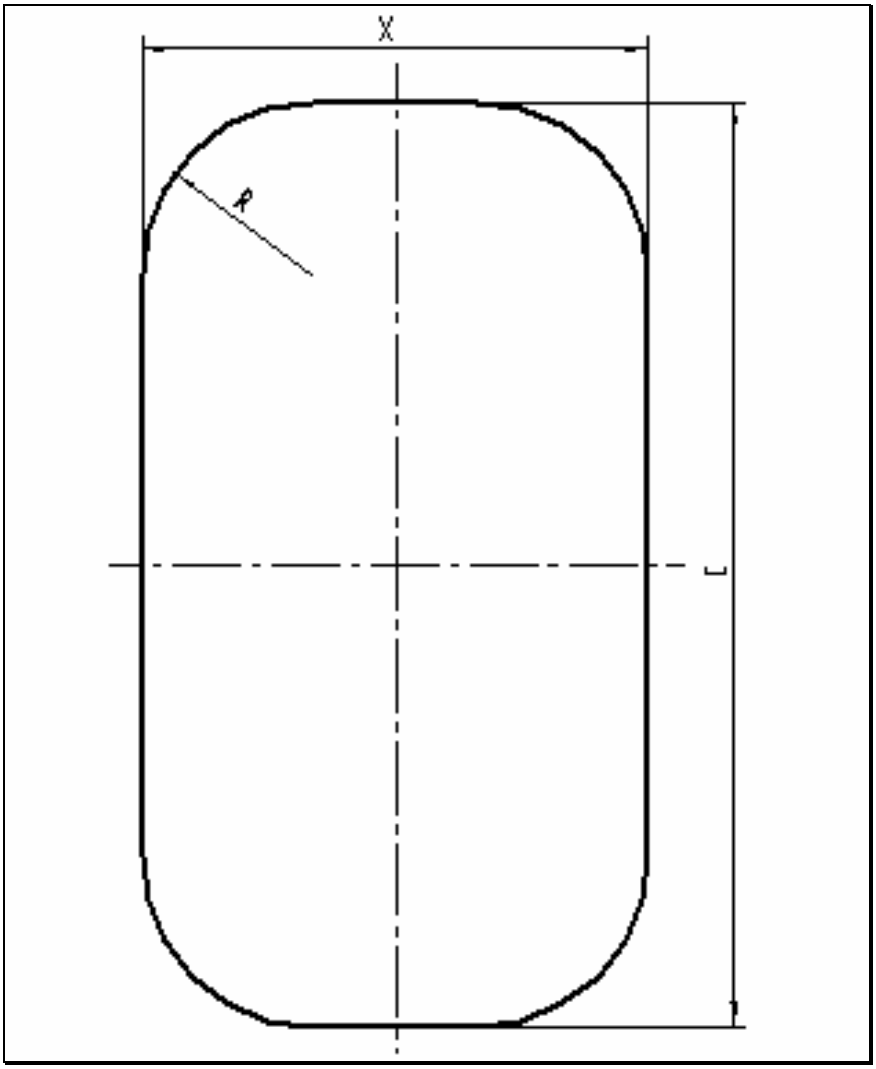
$$\boxed{a = 0.6527\,m}$$

De esta forma quedan determinadas las dimensiones principales de la parte convergente de la tobera.

66) La parte divergente se debe calcular de la misma manera, usando el mismo procedimiento que se utilizó para calcular las dimensiones del largo de la parte convergente. De esta forma se define el elemento longitudinal restante, que es el área de salida la tobera (condiciones ideales). El área transversal (ver figura 14) se calcula de la siguiente manera:

$$A_7 = \pi R^2 + 2R(X - 2R) + X(C - 2R)$$

Figura 14. Esquema de las dimensiones de la sección transversal de salida de la tobera



Diseño del autor

Lo que es equivalente a:

$$A_7 = (\pi - 4)R^2 + 2XR + XC - 2XR$$

Lo que simplificado determina:

$$\boxed{A_7 = (\pi - 4)R^2 + XC}$$

66) Para el caso propuesto con el área de salida obtenida, despejando el lado C se tiene:

$$XC = A_7 - (\pi - 4)R^2$$

$$C = \frac{A_7 - (\pi - 4)R^2}{X}$$

Reemplazando con los valores del numeral 63 se obtiene:

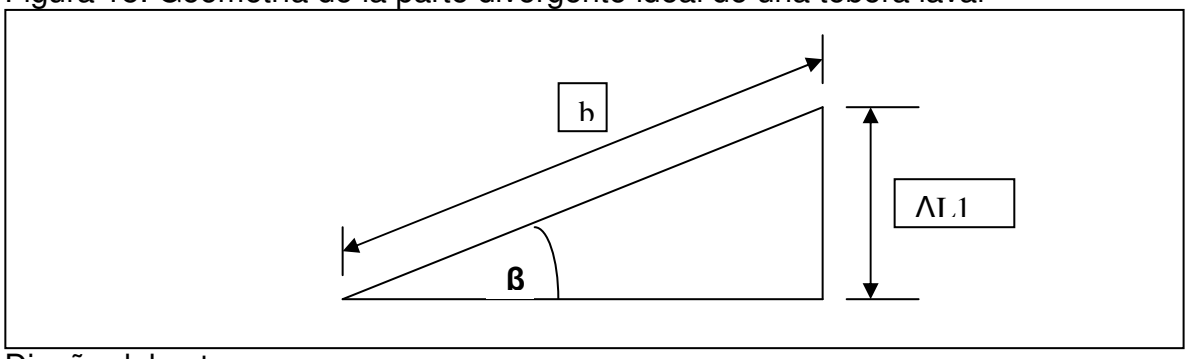
$$C = \frac{0.9646m^2 - (\pi - 4)(0.2624m)^2}{0.7515m}$$

$$C = \frac{1.0237m^2}{0.7515m}$$

$$\boxed{C = 1.3622m}$$

67) Con los datos que se han calculado y el ángulo secundario de la tobera, se tiene la figura 15 para despejar por medio de la ecuación de seno el valor de ΔL1.

Figura 15. Geometría de la parte divergente ideal de una tobera laval



Diseño del autor

Donde:

$$\boxed{\Delta L1 = \frac{C - L}{2}}$$

$$\boxed{sen\beta = \frac{\Delta L1}{b}}$$

67) Para el ejercicio propuesto reemplazando y simplificando se obtiene:

$$\Delta L1 = \frac{1.3622m - 0.5248m}{2}$$

$$\boxed{\Delta L1 = 0.4187m}$$

Despejando en la ecuación del seno:

$$b = \frac{\Delta L1}{sen\beta}$$

$$b = \frac{0.4187m}{sen(6°)}$$

$$\boxed{b = 4.005m}$$

8.4.3.1 Corrección teórica del cálculo de la longitud de la parte divergente.

68) Observando este resultado, es posible inferir que la longitud del lado b es demasiado grande para ser llevado al paso de construcción, esto se debe en gran medida a que el ángulo β es muy pequeño, para esta relación de áreas entre la garganta y la salida, además, al momento de calcular el coeficiente de velocidad de flujo anteriormente, que estaba en función del ángulo secundario de la tobera β, se asumió que las presiones totales en la garganta y la salida eran iguales, lo cual redujo el coeficiente de velocidad y afectó el resultado al disminuir el ángulo de la parte divergente.

Para corregir esta desviación se propone por medio de una sencilla iteración, encontrar un valor más adecuado del ángulo secundario de la tobera, con el fin de calcular las dimensiones más probables o posibles para la parte divergente de la tobera, reemplazando ángulos mayores que el obtenido en el punto anterior acorde a la gráfica del punto 34, en la ecuación:

$$b = \frac{\Delta L1}{sen\beta}$$

68) Para el ejemplo propuesto tomando el gráfico del coeficiente de velocidad de la tobera del punto 34 se tiene:

Para:

$$\Delta L1 = 0.4187m$$

Se puede deducir que el mayor ángulo secundario proporcionará una menor longitud de la parte divergente, lo cual reducirá el tamaño de la tobera, así como también el tamaño del motor. Esto conllevará a mejoras para la reducción de costos durante la fase de adquisición de materiales y de elementos.

Tabla 2. Variación de la longitud de la parte divergente en función del ángulo secundario de la tobera (β)

β (grados)	b (m)
9	2.6765
12	2.0138
16	1.519

Diseño del autor

Es necesario de todas maneras que se estudie el comportamiento de la tobera en los regimenes para los cuales está diseñado el motor, esto quiere decir, que es importante que a pesar de haber seleccionado este ángulo divergente, se debe hacer un estudio del comportamiento de las ondas de choque dentro de la misma, para comprobar su eficiencia, o para retomar un nuevo ángulo que la haga más eficiente en condiciones de operación normales y vectorizada.

69) Con el nuevo valor del ángulo y por medio de la gráfica de coeficiente de velocidad se pueda calcular el valor de la presión a la salida de la tobera en régimen supersónico, creando un valor más acertado para estos cálculos generales, esto se realizará más adelante en donde se tendrán en cuenta los parámetros reales para el estudio del comportamiento del flujo de gas.

Se utilizarán nuevamente las ecuaciones de los puntos 32 y 33, luego de hallar el valor del coeficiente de velocidad, hallando la velocidad actual nuevamente y luego despejando la relación de presiones en la salida, así:

$$C_V = \frac{V_7}{V_{7i}}$$

$$V_7 = \sqrt{R \bullet g_c \bullet T_{7t}} \bullet \sqrt{\frac{2 \bullet \gamma}{(\gamma - 1)} \bullet \left[1 - \left(\frac{P_7}{P_{7t}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

69) Despejando la velocidad actual en la tobera, conociendo el nuevo valor del coeficiente aproximado Cv para un ángulo de divergencia de 16°:

$$C_v = 0.9975$$

$$V_7 = C_v \bullet V_{7i}$$

$$V_7 = 0.9975 \bullet 1550.629 \, m/s$$

$$V_7 = 1546.752 \, m/s$$

Además, despejando la relación de presiones se tiene:

$$\left(\frac{P_7}{P_{7t}}\right) = \left(1 - \frac{V_7^2 \bullet (\gamma - 1)}{R \bullet g_c \bullet T_{7t} \bullet 2 \bullet \gamma}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Y reemplazando se tiene:

$$\left(\frac{P_7}{P_{7t}}\right)=\left(1-\frac{\left(1546.752\,{}^{m}\!/_{s}\right)^2\bullet(1.33-1)}{289.3\frac{N.m}{Kg.°K}\bullet 1.0115\frac{Kg.m}{N.s^2}\bullet 2000°K\bullet 2\bullet 1.33}\right)^{\frac{1.33}{1.33-1}}$$

$$\frac{P_7}{P_{7t}}=\left(1-\frac{789505.8}{1556775}\right)^{\frac{1.33}{0.33}}$$

$$\frac{P_7}{P_{7t}}=(1-0.507142)^{4.030303}$$

$$\boxed{\frac{P_7}{P_{7t}}=0.057753}$$

Finalmente despejando la presión total, conociendo la presión estática de salida, ver punto 31.

$$P_7=22774.96\,{}^{N}\!/_{m^2}$$

$$P_{7t}=\frac{22774.96\,{}^{N}\!/_{m^2}}{0.057753}$$

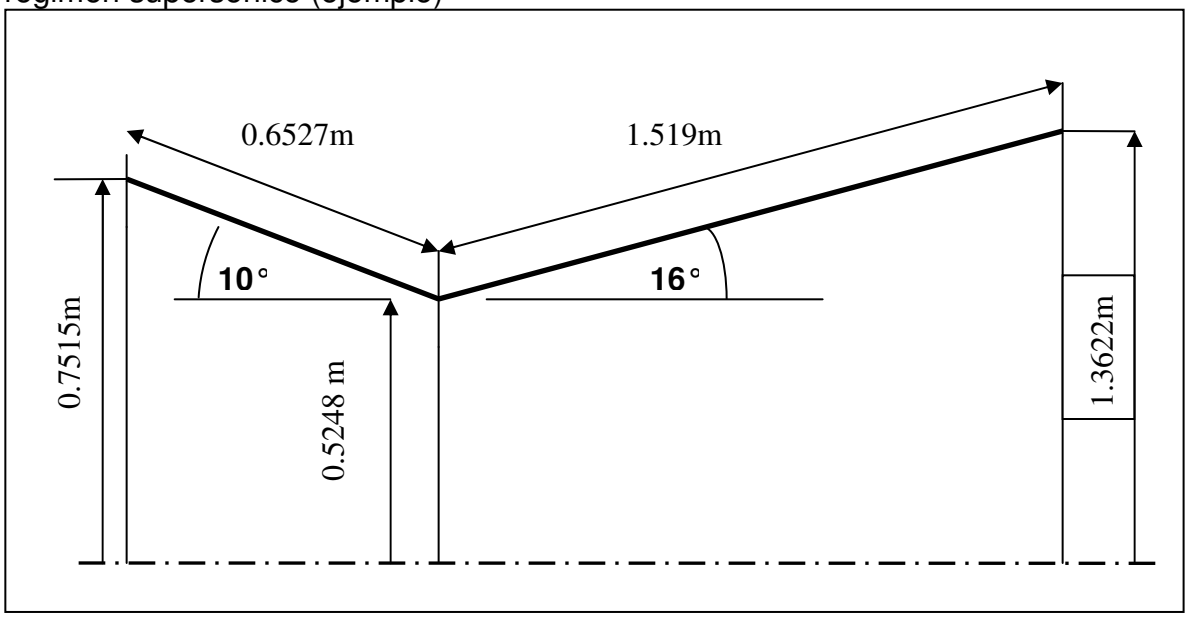
$$\boxed{P_{7t}=394349.2\,{}^{N}\!/_{m^2}}$$

Este dato es muy valioso ya que muestra la variación de la presión total desde la garganta hasta la salida, de la misma forma es posible utilizar este dato para calcular otros valores más cercanos de la parte termogasodinámica de la tobera, en lo que concierne al diseño de la misma, este elemento calculado es el que faltaba para hacer una aproximación válida en el dimensionamiento de la tobera.

70) Finalmente se puede reemplazar en el esquema los valores de dimensionamiento para tener idea del tamaño de la tobera.

70) Para la tobera de ejemplo se tiene el esquema de la figura 16.

Figura 16. Esquema de las dimensiones principales definidas de la tobera en régimen supersónico (ejemplo)



Diseño del autor

8.4.4 Dimensionamiento en régimen subsónico.

71) El análisis para el cálculo de las dimensiones durante el régimen de operación subsónico es bastante simple, ya que conociendo las medidas de la tobera en condición supersónica, simplemente se ajustará la tobera para que cumpla con las longitudes y posición requeridas en operación subsónica (ver figura 17). De esta forma primero es necesario que se tengan en cuenta el área de entrada (constante) y el área de garganta en régimen subsónico (esta área última será igual al área de salida), además del radio de curvatura y la longitud transversal X, valores que fueron calculados en los apartados 51 y 63:

71) Los valores para el ejemplo propuesto son los siguientes:

$$A_5 = 0.5057m$$

$$A^* = 0.3648m$$

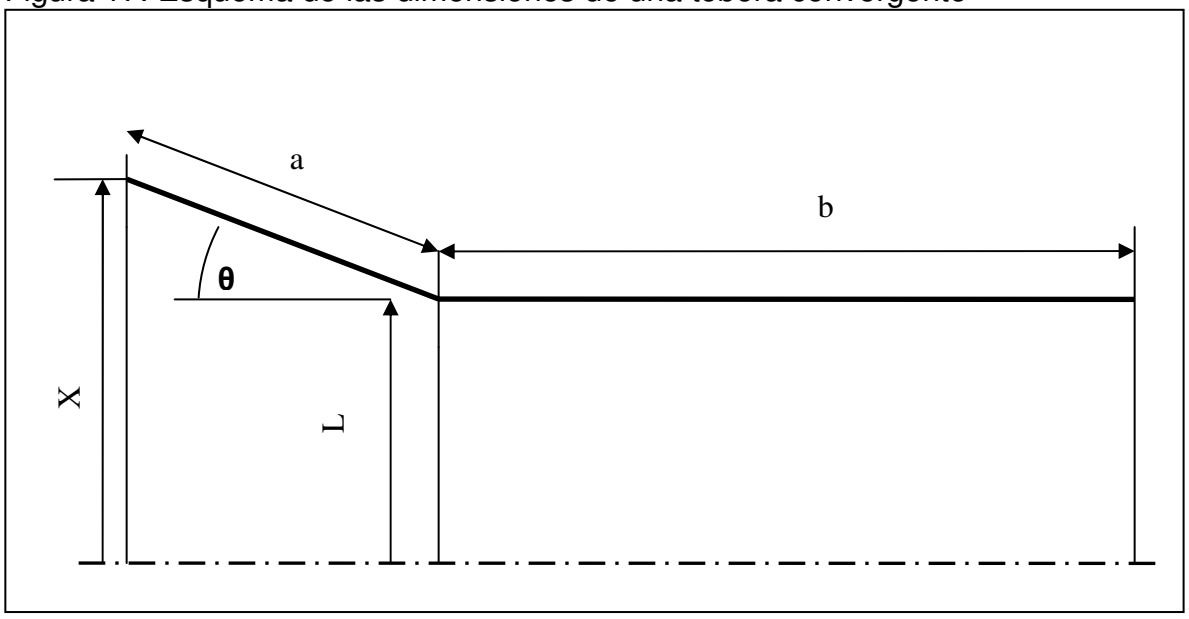
$$X = 0.7515m$$

$$R = 0.2624m$$

$$b = 1.519m$$

$$a = 0.6527m$$

Figura 17. Esquema de las dimensiones de una tobera convergente



Diseño del autor

72) Con estos datos ahora es posible calcular la nueva dimensión L para la nueva área de garganta que se utilizará en régimen subsónico (ver figura 11). De esta forma utilizando la siguiente ecuación, despejando y calculando el valor L se tiene:

$$A^* = (\pi - 4)R^2 + XL$$

Esta ecuación fue calculada en el apartado 66, lo único que varía es el lado C por el lado L.

72) Para el cálculo propuesto se tiene:

$$XL = A^* - (\pi - 4)R^2$$

$$L = \frac{A^* - (\pi - 4)R^2}{X}$$

Reemplazando con los valores del apartado 71 se obtiene:

$$L = \frac{0.3648m^2 - (\pi - 4)(0.2624m)^2}{0.7515m}$$

$$L = \frac{0.4239m^2}{0.7515m}$$

$$\boxed{L = 0.564m}$$

73) Con estos datos ahora es posible medir la longitud de la parte convergente de la tobera, teniendo en cuenta que la longitud de la parte convergente (a), la longitud en la entrada (X) y la longitud en la garganta (L) de la misma, y por medio de la relación trigonométrica seno (remitirse a figura 13) se obtiene:

$$\boxed{\Delta L = \frac{x - L}{2}}$$

$$\boxed{sen\theta = \frac{\Delta L}{a}}$$

73) Para el ejercicio reemplazando y simplificando se obtiene:

$$\Delta L = \frac{0.7515m - 0.564m}{2}$$

$$\boxed{\Delta L = 0.09375\ m}$$

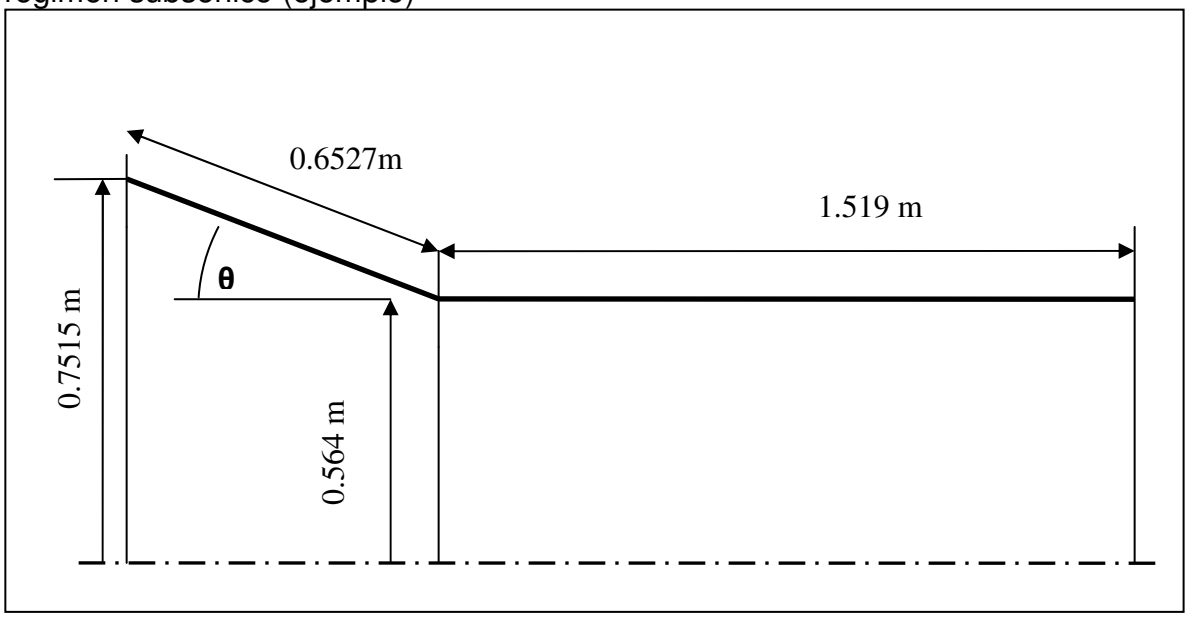
Despejando en la ecuación del seno el lado a se obtiene:

$$\theta = sen^{-1}\left(\frac{\Delta L}{a}\right)$$

$$\theta = sen^{-1}\left(\frac{0.09375m}{0.6527m}\right)$$

$$\boxed{\theta = 8.2581°}$$

Figura 18. Esquema de las dimensiones principales definidas de la tobera en régimen subsónico (ejemplo)



Diseño del autor

De esta forma quedan determinadas las dimensiones principales de la parte convergente de la tobera.

8.5 COMPROBACIÓN DE LOS DATOS

La manera de comprobar el procedimiento anterior se hizo mediante el programa de estudio de fluido dinámico computacional CFD, software FLUENT 6, en base a él se realizarán los estudios posteriores de comportamiento del flujo durante la vectorización. Este programa posee las siguientes características:

8.5.1 Descripción general del software CFD. Este determinado tipo de programas tienen la función general de modelar el flujo de fluidos y la transferencia de calor en variadas geometrías. Por medio del enmallado, el programa modela y resuelve variados problemas de flujo de fluidos.

Entre las principales características aplicables al proyecto, este software en específico tiene las siguientes capacidades de modelamiento:

- Modelamiento de geometrías en 2D o 3D.

- Análisis de flujos estables o de flujos transitorios.

- Simulación de flujos compresibles o incompresibles en todos los regimenes de velocidad (subsónico, supersónico, etc.).

- Análisis de flujos no viscosos, flujos laminares o flujos turbulentos.

NOTA: Para el caso al que se hace referencia, el programa de análisis de flujo será utilizado para los siguientes procedimientos:

- **Realizar la comprobación de los procedimientos con los cuales se realizaron los cálculos termogasodinámicos en los regimenes subsónico y supersónico.**

- **Estudiar el comportamiento del flujo con respecto a la distribución de la presión y velocidad del mismo en los diferentes regimenes planteados**

y teniendo en cuenta el efecto de la vectorización, para las diferentes propuestas como se verá más adelante, partiendo de esto para formular unas recomendaciones generales para realizar el proceso de vectorización más efectivo.

Para esto el programa se basa en el análisis de elementos finitos por medio de los cuales se realizan las iteraciones correspondientes en función del tipo de enmallado que se tenga, el tamaño de sus celdas y los parámetros de análisis y de entrada con los cuales se trabaje. Para una mejor aproximación en los cálculos el análisis debe seleccionar un tipo de enmallado óptimo en sus características que permitan realizar los cálculos adecuadamente y de la misma manera, obtener resultados más exactos.

Luego de colocar los requerimientos para utilizar el programa, el mismo se encarga de analizar la información de entrada proporcionada que para el caso propuesto es:

- Presión estática de entrada.
- Presión total de entrada.
- Temperatura estática de entrada.
- Presión estática de salida.

Adicional para el programa existen datos adicionales relacionados con las características del flujo que se necesitan para hacer las iteraciones necesarias del cálculo del flujo, las cuales son:

- Viscosidad.
- Peso molecular.
- Conductividad térmica.

- Calor específico a presión constante.

Parte de esta información se puede encontrar las siguientes tablas del anexo F, en estas, se relacionan algunos de los parámetros de comportamiento para algunos gases en función de la temperatura.

NOTA: El programa de CFD FLUENT 6 trabaja sin que el cambio de unidades afecte los resultados, es decir, sin tener en cuenta las unidades el programa realiza las conversiones necesarias internamente y genera una solución en las unidades necesitadas, en caso contrario se hará necesario cambiar las unidades al sistema de medición adecuado para realizar los cálculos. Es por esto que se utilizarán las gráficas del anexo F para la recopilación de información enfocada al comportamiento de los gases.

74) Para el caso propuesto y aplicando el factor de conversión de grados Kelvin a grados Fahrenheit se puede observar que el valor se encuentra por fuera de los límites de la gráfica del anexo F, por lo cual se recomienda hacer una linealización o aproximación según la tendencia de la curva hasta el valor necesitado y en base en él se miden los parámetros necesarios; así aplicando la ecuación de conversión se obtiene:

$$\boxed{°F = \frac{9}{5}°K - 459.67}$$

74) Calculando con la temperatura total de entrada seleccionada previamente en el apartado No. 2 se obtiene:

$$T_{5t} = \frac{9}{5}(2000°K)\frac{°F}{°K} - 459.67°F$$

$$\boxed{T_{5t} = 3140.334°F}$$

Este punto adicional permitirá tener una referencia del comportamiento del gas a determinadas temperaturas, y servirá como una herramienta en cálculos más exactos y aproximados a las condiciones reales.

Nota: Es necesario que se tenga en cuenta, para referencia de las gráficas, los productos principales de los gases de combustión entre los que están:

- **Monóxido de Carbono (CO):** 10-50 ppm.

- **Óxidos de Nitrógeno (NO_x):** 50-440 ppm.

- **Dióxido de Nitrógeno (NO_2):** 50-440 ppm.

- **Hidrocarburos (HC):** 5-25 ppm.[9]

8.5.2 Consideraciones adicionales. En esta parte de comprobación de datos, es necesario mencionar una característica adicional de geometría que tiene que ser optimizada para generar un rendimiento alto del funcionamiento de la tobera.

Aunque anteriormente se propuso una manera simple para la determinación de la geometría longitudinal de la tobera y su sección transversal, es necesario que se realice una perfilamiento (suavización) de la forma longitudinal de la misma por las siguientes razones:

- Para reducir o eliminar los concentradores de esfuerzos que se generarían en las esquinas de la parte de la garganta, ya que esto a corto plazo afectaría la estructura de la misma.

- Para que el cambio en las condiciones del flujo sea de cierta manera "regulado" o "acondicionado" a medida que este se desplaza a lo largo de la tobera. Esta suavización de flujo lo que determinará es la región óptima en la cual el gas se comportará uniformemente a través de la misma, no se generarán cambios bruscos del mismo dentro de la tobera; adicional a esto, permitirá que el gas realice su expansión completamente sin ningún tipo de obstrucción que disminuya el rendimiento operacional de la tobera.

[9] OÑATE, Antonio Esteban. Sistemas y Propulsión de Aviones, Turborreactores. Salamanca (España): ed. Sumaas. 1981. p.

• Aunque las toberas de empuje vectorial funcionan principalmente en aeronaves de tipo supersónico, el análisis propuesto enfoca también una parte al estudio del régimen subsónico, lo cual genera que la tobera deberá al menos trabajar en estas 2 posiciones independientes, de la manera más eficaz posible. De esta manera el perfilamiento de la tobera se debe enfocar en la necesidad de producir una geometría que cumpla de la mejor forma las condiciones de operación para ambos regimenes de vuelo.

Aunque existe variada información acerca del tema de perfilamiento de toberas, es bastante extenso el trabajo que se debe realizar, ya que por un lado se encuentra la influencia de las ondas de choque que se puedan generar dentro, y por el otro lado, deben realizarse cálculos más exactos en donde se evalúe cual es el comportamiento del flujo con la influencia del flujo másico, el intercambio de temperatura con el material y su respectiva refrigeración, ademáas, el sistema de actuación que maneje, que requerirá entre más funciones aplicables, mayor número de elementos necesarios para controlar dichas funciones.

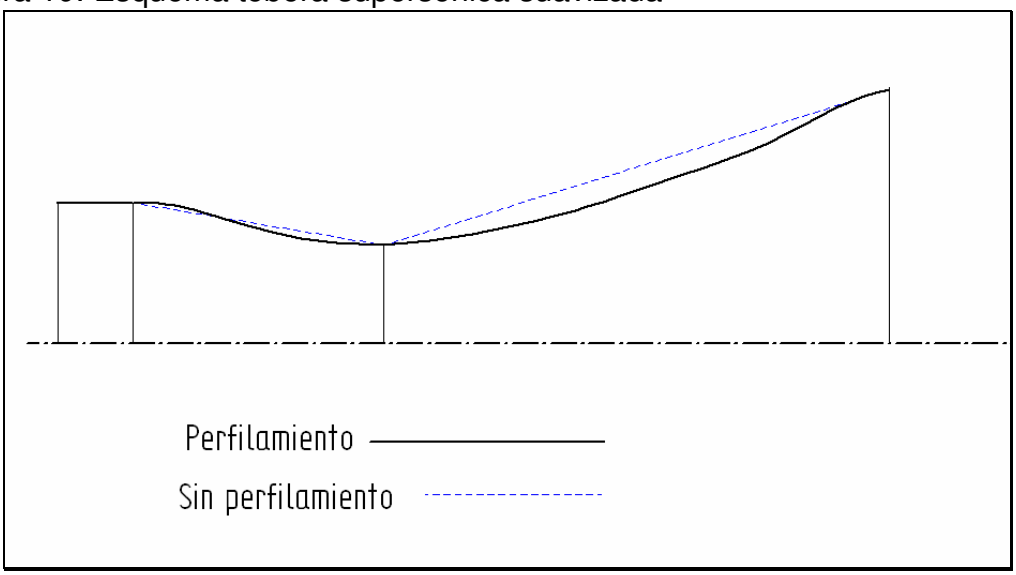
Para el caso propuesto, la idea es ajustar la sección al comportamiento del flujo en régimen supersónico, respetando las dimensiones y forma requeridas para operar en régimen subsónico. En las figuras 19 y 20 se muestran los esquemas de la sección suavizada.

NOTA: La suavización de la tobera fue realizada experimentalmente, utilizando el programa de CFD en un plano 2-D para verificar el comportamiento normal del flujo dentro del mismo. Estudios y análisis posteriores requerirán un estudio detallado del perfilamiento de la tobera, lo cual se plantea como tema de estudio adicional que no hace parte de este documento.

8.5.3 Comprobación de los datos en condiciones supersónicas. Utilizando los parámetros requeridos y teniendo en cuenta los siguientes modelos de resolución recomendados por el software FLUENT 6, se trabajará el programa con las siguientes condiciones de análisis:

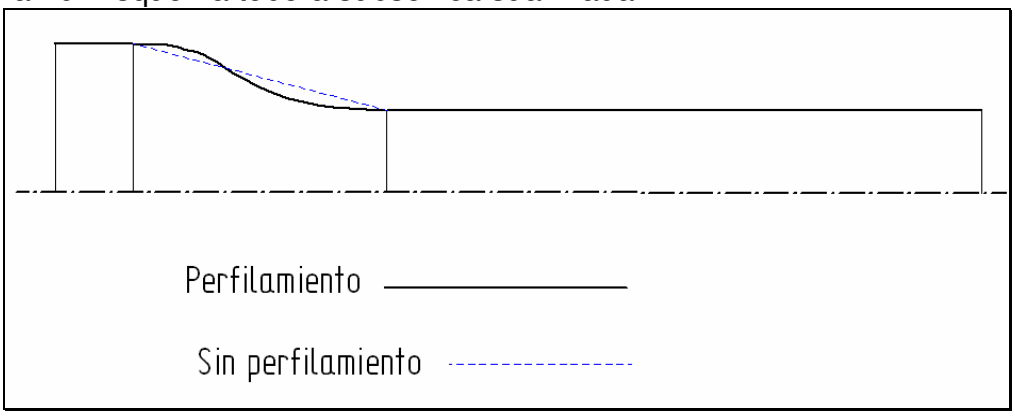
NOTA: El análisis de flujo mostrará la distribución de algunos parámetros en una sección equivalente a la cuarta parte de toda la tobera de una forma simétrica, para mostrar como cambian los mismos transversalmente teniendo en cuenta que la sección en su geometría no tiene sección simétrica.

Figura 19. Esquema tobera supersónica suavizada



Diseño del autor

Figura 20. Esquema tobera subsónica suavizada

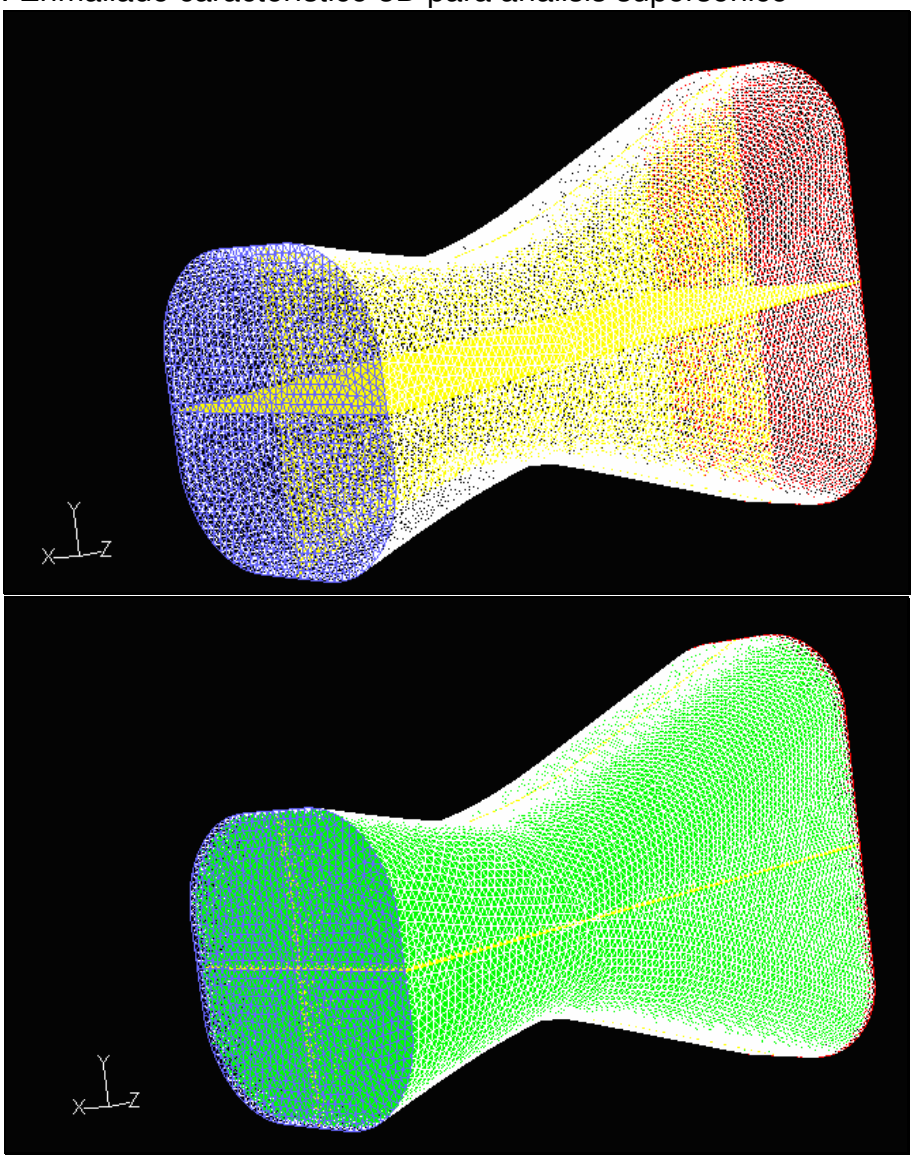


Diseño del autor

- Solucionador:

- Método acoplado implícito para flujo estable: Esta opción es recomendada para el estudio y modelamiento de un gas real definido con unas características previas proporcionadas mencionadas anteriormente. La opción implícita permite llegar a una solución convergente rápidamente a costa de un gran uso de memoria utilizada por el computador, lo cual no es un factor que pueda afectar mayormente la resolución del problema.

Figura 21. Enmallado característico 3D para análisis supersónico



Programa CFD FLUENT 6,2 3-D

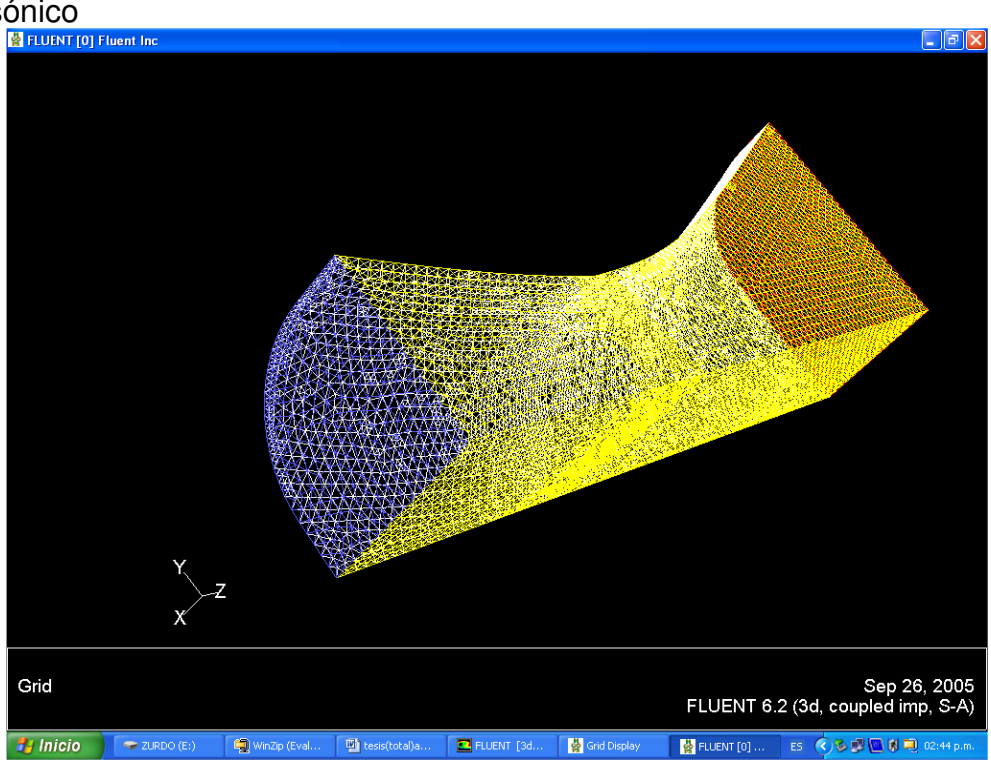
Análisis 3-D: Se exportará un esquema con las dimensiones reales calculadas previamente, este debe poseer unas características de enmallado que permitan obtener unos resultados confiables y cercanos a los parámetros reales, el enmallado se muestra en las figuras 21 y 22. El enmallado de la tobera fue hecho bajo los siguientes parámetros, los cuales fueron determinados experimentalmente como los más eficientes y menos fluctuantes teniendo en cuenta el criterio de ensayo y error:

- Espacio entre nodos: 0.02 m.
- Tipo de elementos en el enmallado: tetragonal /híbrido.
- Tipo de enmallado: Mapa.

- Ecuaciones de Euler:

- Ecuación de la Conservación de la Energía.
- Ecuación de la Conservación de la Masa.
- Ecuación de la Conservación de Momento.

Figura 22. Enmallado característico sección de la tobera para análisis supersónico



Programa CFD FLUENT 6,2 3-D

- Se analiza la viscosidad por la ecuación de transporte para el modelo Spalart-Allmaras. La variable V transportada en este modelo se identifica con la viscosidad dinámica del flujo con excepción en las regiones cercanas a las paredes o muros donde la viscosidad se ve afectada. La ecuación de transporte es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{\nu})+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\bar{\nu}u_i)=G_\nu+\frac{1}{\sigma_\nu}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu+\rho\bar{\nu})\frac{\partial\bar{\nu}}{\partial x_j}\right\}+C_{b2\rho}\left(\frac{\partial\bar{\nu}}{\partial x_j}\right)^2\right]-Y_\nu+S_\nu$$

Donde:

G_ν = Es la producción de la viscosidad turbulenta.

Y_ν = Es la destrucción de la viscosidad turbulenta dado por el bloqueo por medio de los muros o contornos y la suavización del flujo.

σ_ν y C_{b2} = Valores constantes.

υ = Es la viscosidad molecular cinemática.

S_ν = Es un término definido propiamente por el usuario.

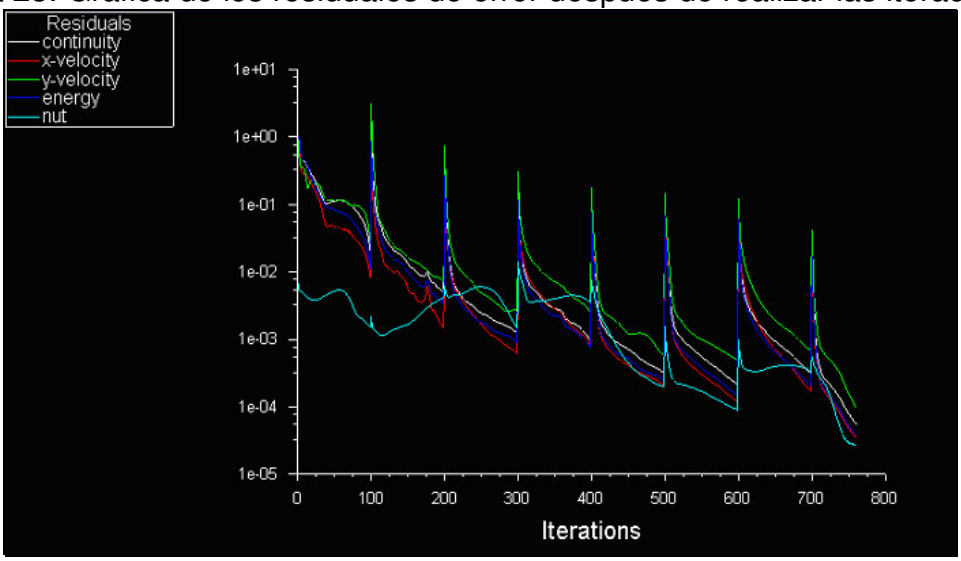
- No se asume análisis de intercambio de calor (es un tema que no está contemplado en este proyecto).

8.5.3.1 Resultados en la comprobación de datos de cálculo termogasodinámico supersónico. Luego de realizar los procedimientos necesarios e iterar las ecuaciones correspondientes para análisis de flujo dentro de la tobera, como se verá a continuación se validará el método que fue planteado anteriormente para la resolución de los cálculos termogasodinámicos. A partir de esto se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras siguientes:

- **Medida del error en la solución de las iteraciones.** En las gráficas siguientes (figuras 23 y 24) se muestra la convergencia del valor de solución para las ecuaciones planteadas, así mismo, el valor del error con respecto a la respuesta exacta, el factor de convergencia seleccionado es de 1e-04. La figura 24 muestra el error con respecto al flujo másico y su variación en el

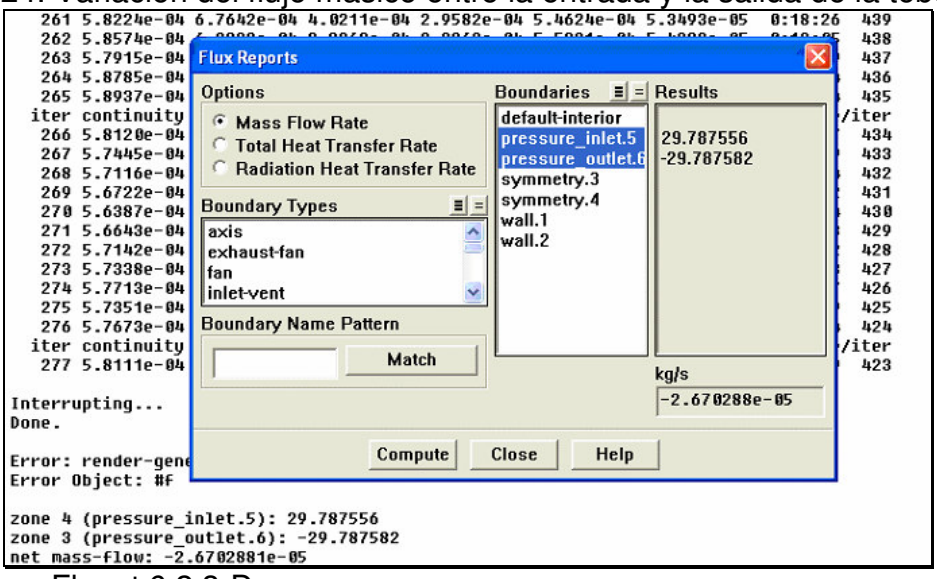
análisis iterativo ideal con respecto a la entrada y a la salida, este error como se observa luego de las iteraciones es de alrededor de 0.002%.

Figura 23. Gráfica de los residuales de error después de realizar las iteraciones



Programa Fluent 6,2 3-D

Figura 24. Variación del flujo másico entre la entrada y la salida de la tobera



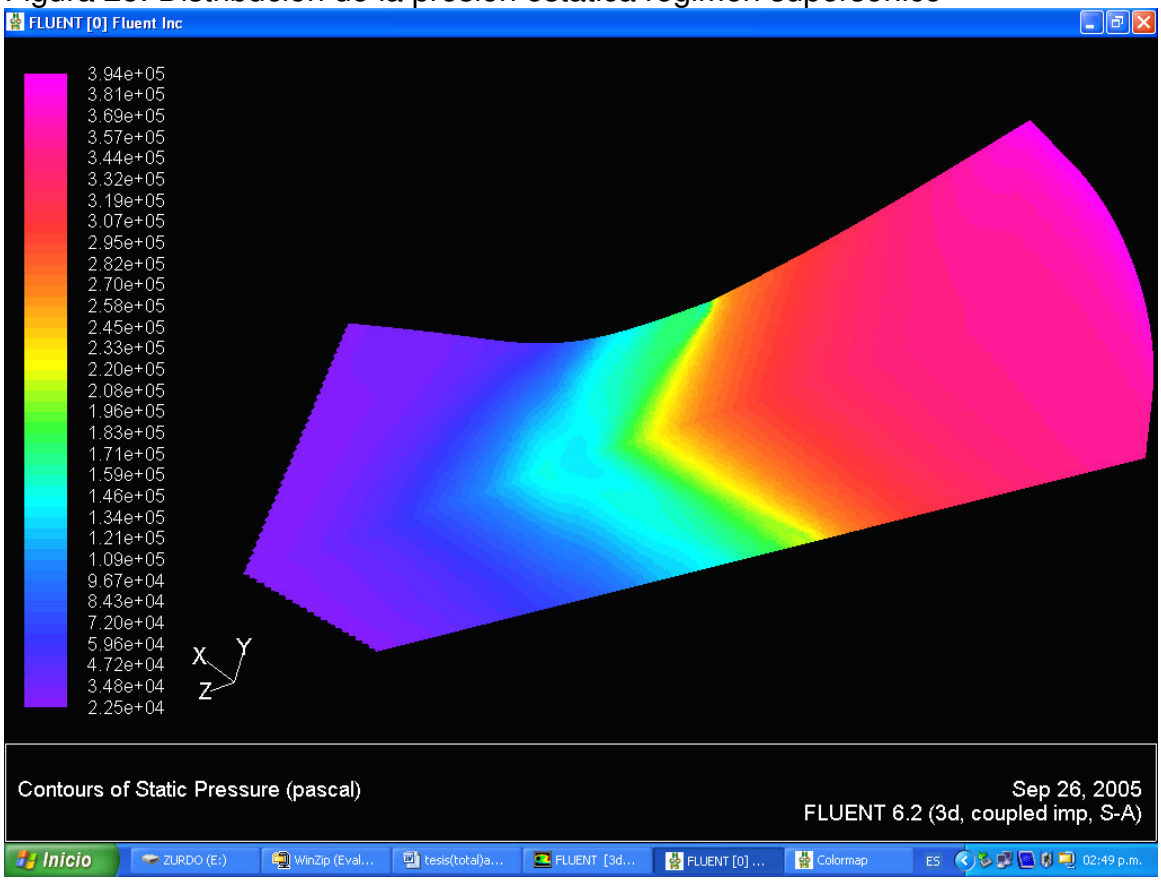
Programa Fluent 6,2 3-D

El programa recomienda que para cálculos exactos este valor debe estar por debajo del 0.5%. Se debe realizar una comparación visual con respecto a la

gráfica para determinar los valores aproximados a los resultados calculados por el método manual.

- **Distribución de presiones.** A continuación, en la figura 25 se muestra la distribución de la presión estática a lo largo de la tobera en sus diferentes contornos para un cuarta parte de toda la tobera. Como se puede observar los resultados planteados en el procedimiento anterior, son muy aproximados con respecto al procedimiento planteado, con lo cual se puede comprobar los resultados. Para los valores es necesario remitirse a los apartados No. 11, 21 y 22, se debe realizar una comparación visual con respecto a la gráfica para determinar los valores aproximados a los resultados calculados por el método manual.

Figura 25. Distribución de la presión estática régimen supersónico



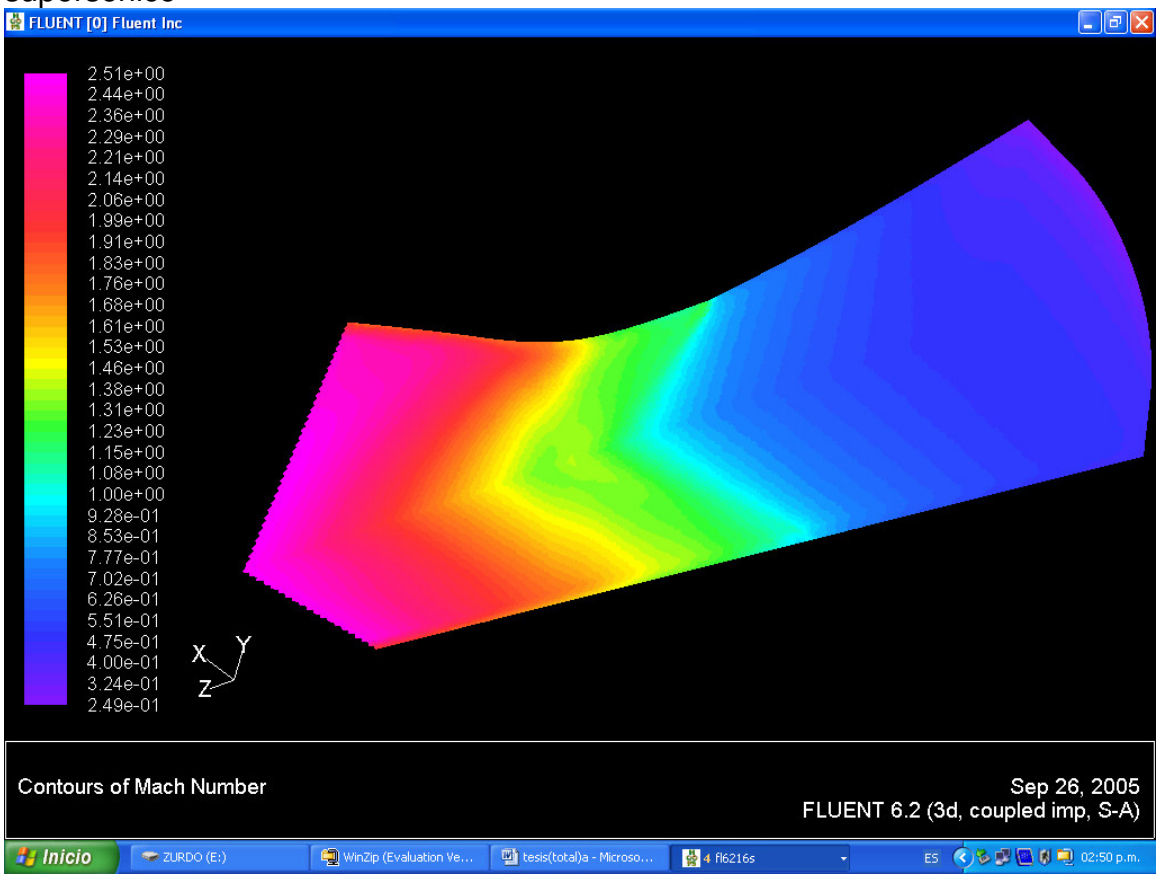
Programa Fluent 6,2 3-D

La gráfica corrobora los valores obtenidos en la simulación de CFD, mostrando que la P_5 = 3.94e05 Pa, P^* = 2.08e05 Pa y P_7 = 2.25e04 Pa se aproxima a los

valores obtenidos en el desarrollo de los cálculos termogasodinámicos, indicando así que la mayor presión estática de este análisis se encuentra en la entrada de la garganta, y que como se esperaba la garganta es la zona de mayor transición de estas presiones, además se muestra que la expansión es completa ya que la presión en la zona de salida es igual a la atmosférica.

- **Distribución de la velocidad en términos de número de Mach.** En la figura 26 se muestra la variación de la velocidad en términos del Número de Mach, a lo largo de la tobera en sus diferentes contornos. Como se puede observar los resultados planteados en el procedimiento anterior se acercan mucho a los valores calculados previamente, con lo cual se puede comprobar sus resultados. Para los valores es necesario remitirse a los apartados No. 7, 17, 23; se debe realizar una comparación visual con respecto a la gráfica para determinar los valores aproximados a los resultados calculados por el método manual.

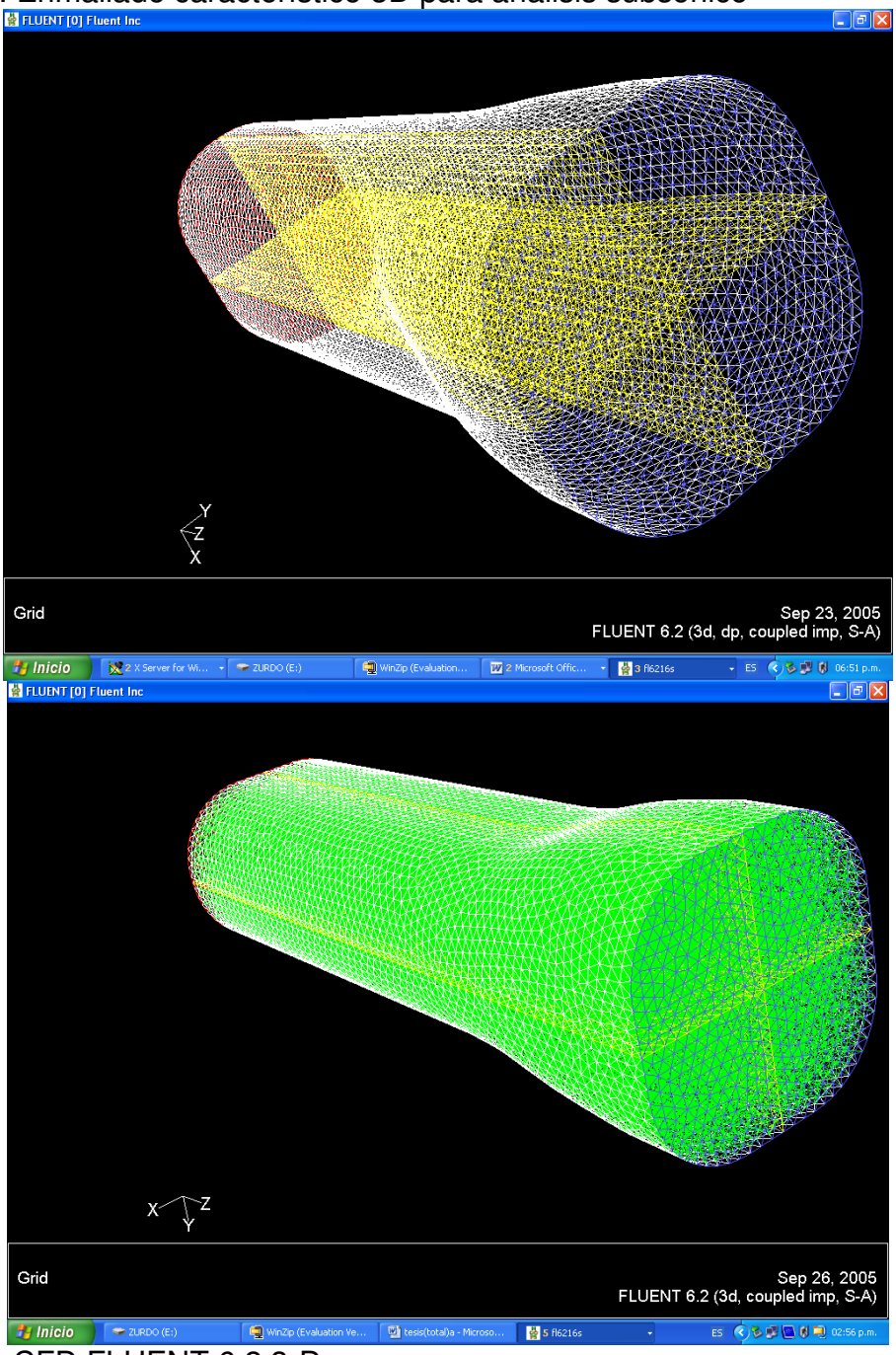
Figura 26. Distribución de la velocidad (Número de Mach) en régimen supersónico



Programa Fluent 6,2 3-D

Las condiciones de análisis de esta simulación asumieron que la tobera se encontraba en las condiciones de máxima eficiencia, donde para cumplir con esto el Mach de la garganta debe ser igual a 1, esto se identifica claramente en la gráfica al observar que $M_5 = 0,4$, $M^* = 1$ y $M_7 = 2.5$.

Figura 27. Enmallado característico 3D para análisis subsónico



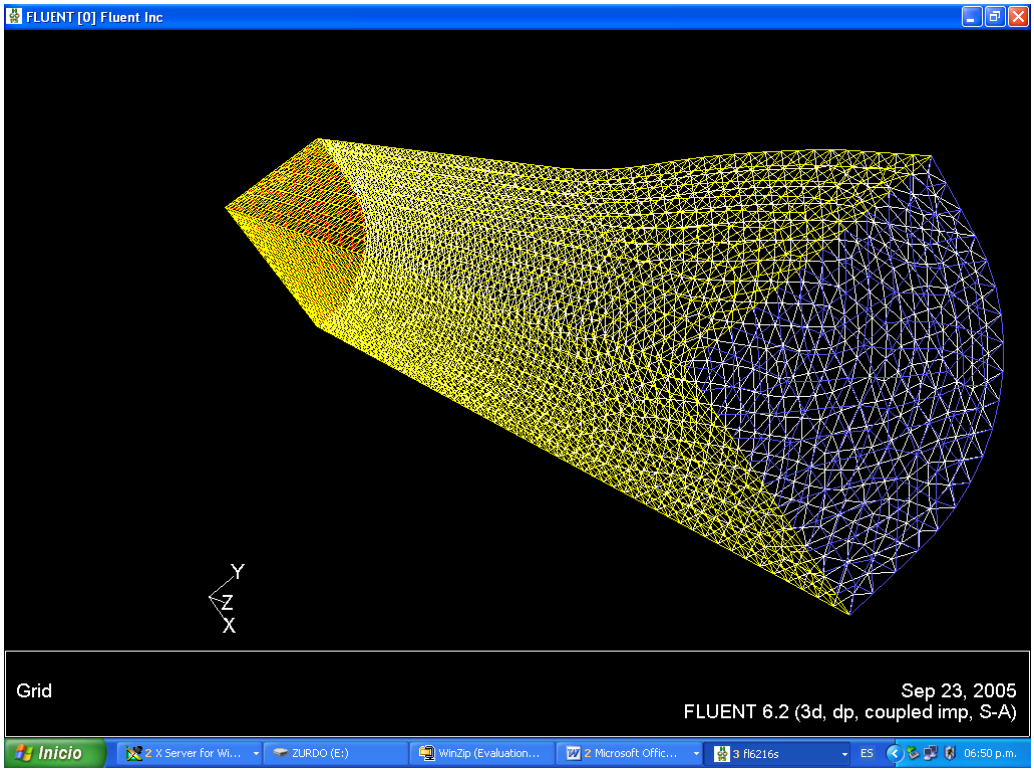
Programa CFD FLUENT 6,2 3-D

8.5.4 Comprobación de los datos en condiciones subsónicas. Utilizando los parámetros requeridos y teniendo en cuenta los siguientes modelos de resolución recomendados por el software FLUENT 6.12, se trabajará el programa con las siguientes condiciones de análisis (se utiliza el mismo procedimiento que el descrito en la sección 8.5.3, hecho para flujo supersónico):

- Solucionador: Método acoplado implícito para flujo estable

Análisis 3-D: Se exportará un esquema con las dimensiones reales calculadas previamente, este debe poseer unas características de enmallado que permitan obtener unos resultados confiables y cercanos a los parámetros reales, el enmallado se muestra en las figuras 27 y 28.

Figura 28. Enmallado característico sección de la tobera para análisis subsónico



Programa CFD FLUENT 6,2 3-D

El enmallado de la tobera fue hecho bajo los siguientes parámetros:

- Espacio entre nodos: 0.02 m.
- Tipo de elementos en el enmallado: tetragonal /híbrido.
- Tipo de enmallado: Mapa.

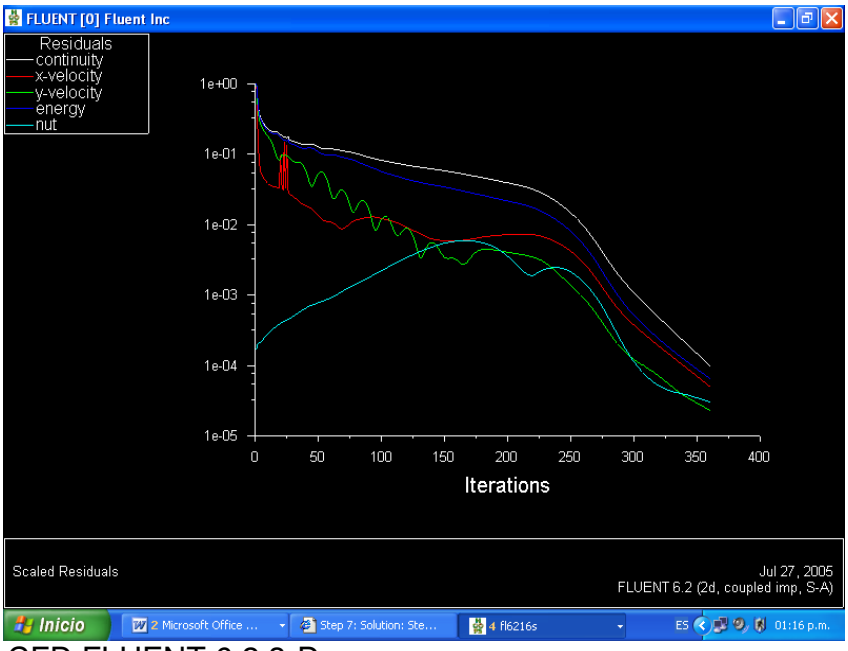
- Ecuaciones de Euler.

- Ecuación de la Conservación de la Energía.
- Ecuación de la Conservación de la Masa.
- Ecuación de la conservación de Momento.

- No se asume análisis de intercambio de calor (es un tema que no está contemplado en este proyecto).

8.5.4.1 Resultados en la comprobación de datos de cálculo termogasodinámico subsónico. Utilizando los parámetros requeridos y teniendo en cuenta los modelos de resolución utilizados en el capítulo anterior para el análisis supersónico, el software ha generado los siguientes esquemas para lo datos proporcionados en régimen subsónico.

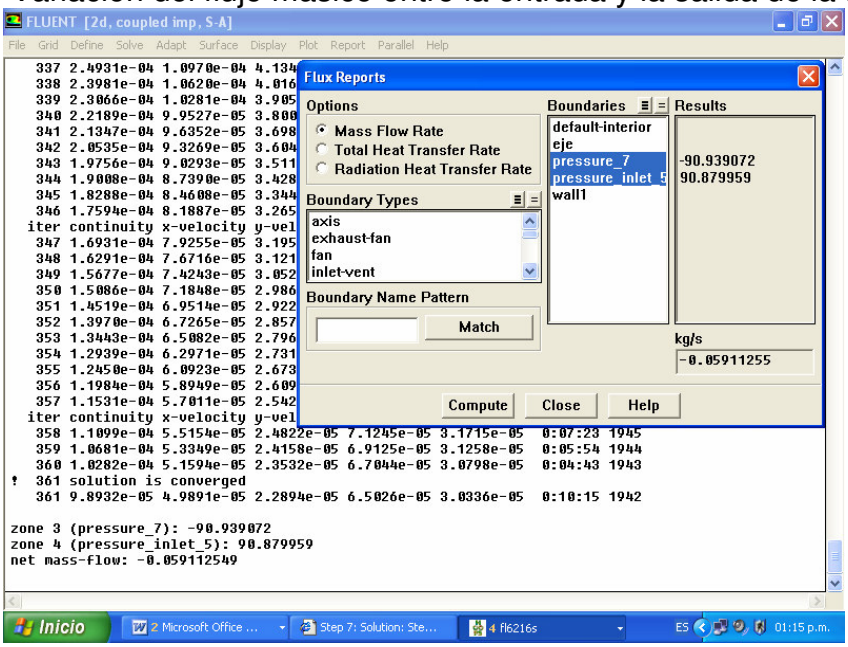
Figura 29. Gráfica de los residuales de error después de realizar los cálculos respectivos



Programa CFD FLUENT 6,2 3-D

Como se observará a continuación, los datos calculados previamente son muy cercanos a las condiciones de simulación propuestas por el programa, lo cual asegura que la metodología sea correcta.

Figura 30. Variación del flujo másico entre la entrada y la salida de la tobera



Programa CFD FLUENT 6,2 3-D

- **Medida del error en la solución de las iteraciones.** En las gráficas 29 y 30 se muestra la convergencia del valor de solución para las ecuaciones planteadas, así mismo, el valor del error con respecto a la respuesta exacta, el factor de convergencia seleccionado es de 1e-04. se debe realizar una comparación visual con respecto a la gráfica para determinar los valores aproximados a los resultados calculados por el método manual.

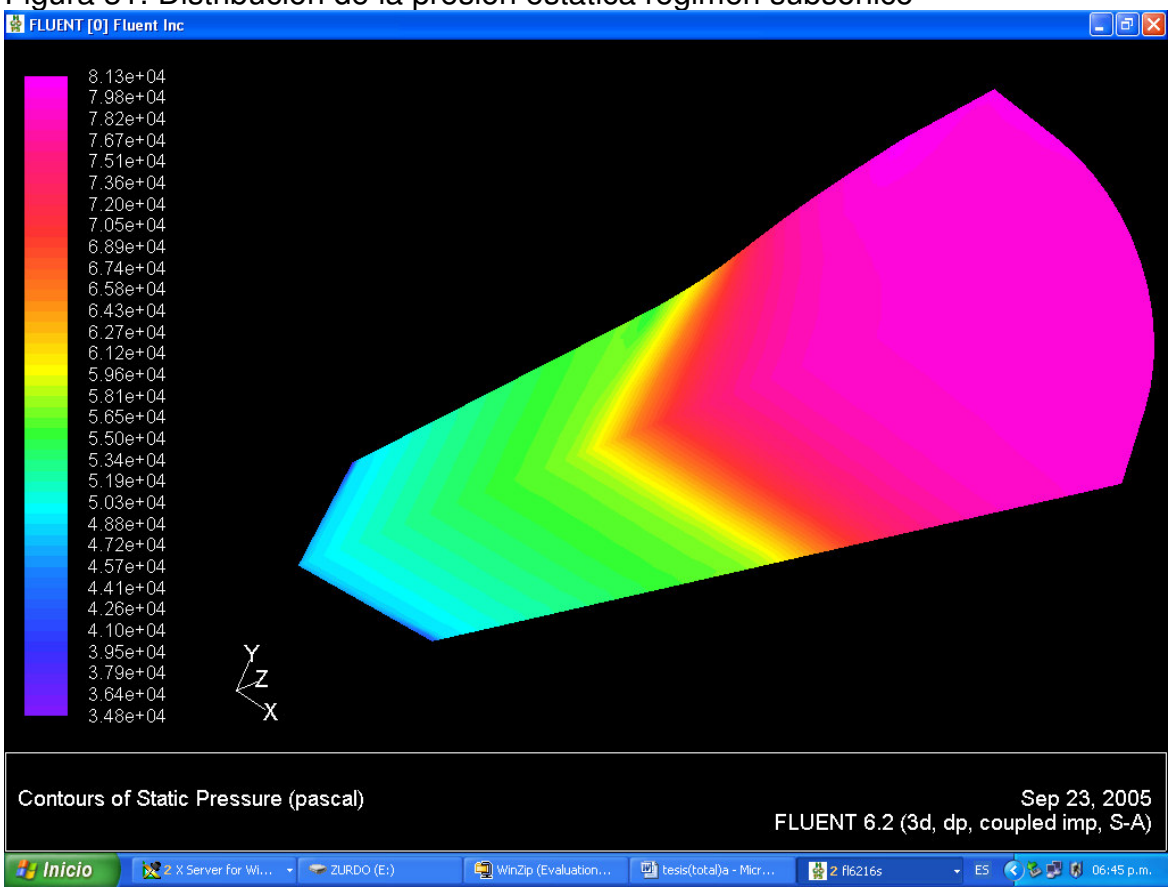
- **Distribución de presiones.** En la figura 31 se muestra la distribución de la presión estática a lo largo de la tobera en sus diferentes contornos. Para los valores es necesario remitirse a los apartados No. 50, 58, y 59 se debe realizar una comparación visual con respecto a la gráfica para determinar los valores aproximados a los resultados calculados por el método manual.

Con respecto a la información que arroja la gráfica, se puede observar claramente que la mayor presión estática se presenta en la zona de entrada de la tobera ($8.13*10^4$Pa), esta presión empieza a disminuir gradualmente con

algunos saltos de presión hasta llegar a la zona de la garganta donde sufre un cambio de presión, su magnitud se reduce de forma drástica debido al cambio de sección de la tobera permitiendo que el gas se expanda hasta llegar a una presión en la salida muy baja ($5*10^4$Pa).

Para el régimen subsónico los parámetros de presión estática muestran que en la simulación y en los cálculos preliminares los valores son acertados, el comportamiento del flujo muestra que P_5 = 7.98e04 Pa, P^* = 5.96e04 Pa y P_7 = 3.64e04 Pa, aunque, si el valor de presión estática de salida varía un poco más que entre lo teórico y la simulación, las condiciones subsónicas no requieren expansión completa u obturación, por tanto estos valores son permisibles.

Figura 31. Distribución de la presión estática régimen subsónico

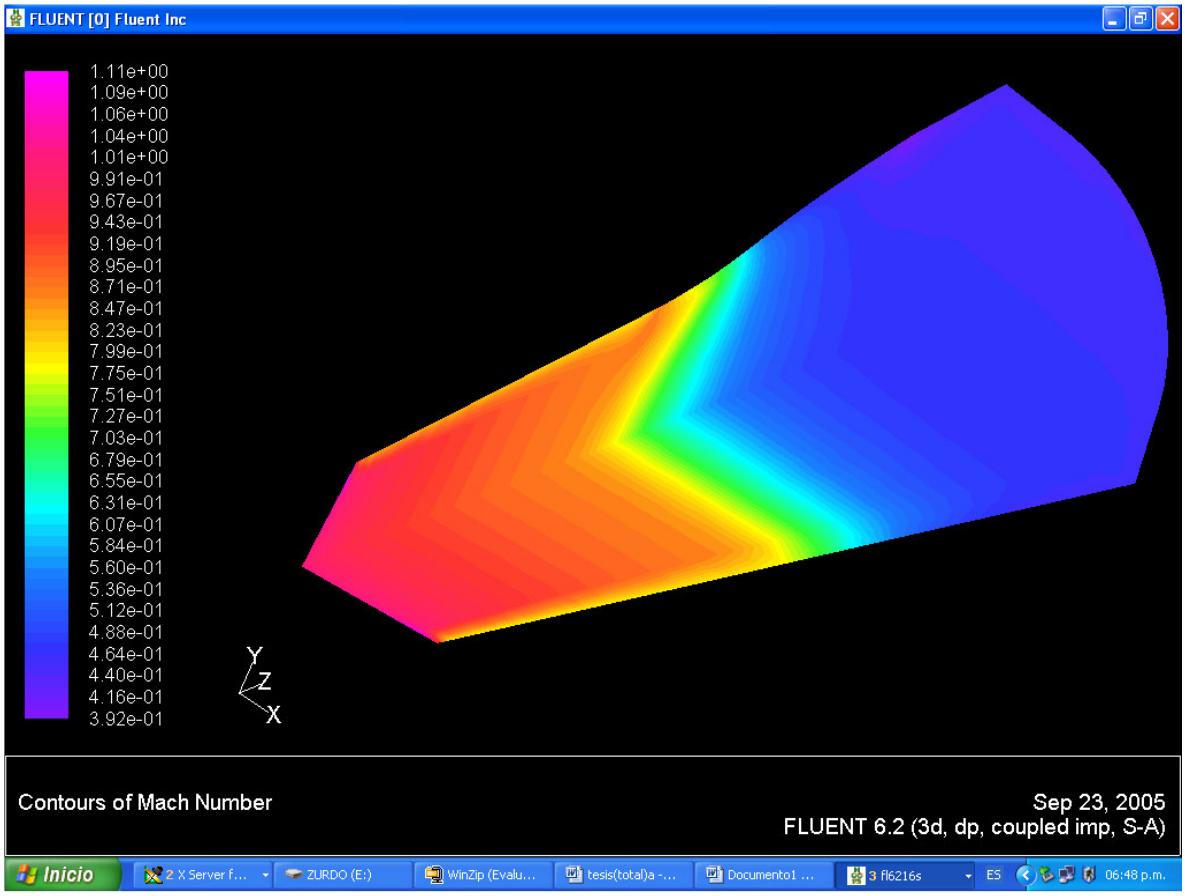


Programa Fluent 6,2 3-D

- **Distribución de la velocidad.** En las figuras 32 se muestra la variación de la velocidad en términos del Número de Mach adimensional, a lo largo de la tobera en sus diferentes contornos. Como se puede observar los resultados

planteados en el procedimiento anterior se acercan mucho a los valores calculados previamente, con lo cual se puede comprobar los resultados. Para los valores es necesario remitirse a los apartados No. 43, 46 y 55 se debe realizar una comparación visual con respecto a la gráfica para determinar los valores aproximados a los resultados calculados por el método manual.

Figura 32. Distribución de la velocidad (Número de Mach) en régimen subsónico



Programa Fluent 6,2 3-D

Con respecto a la información que se obtiene de la gráfica de velocidad, esta se caracteriza porque en la sección de entrada tiene una magnitud baja (M = 0.48), esta progresivamente va aumentando a medida que pasa por el conducto convergente, hasta llegar a la zona de la garganta en donde se tiene el valor de velocidad crítico (M = 0.7), luego aumenta aún más la velocidad al pasar el flujo por a lo largo de la zona del tubo recto, hasta obtener el mayor valor cerca de la salida (M = 1).

Las condiciones subsónicas fueron establecidas satisfactoriamente mediante el software ya que $M_5 = 0,41$ $M^* = 0,72$ y $M_7 = 0,94$, por tanto es claro que el flujo tiene características aceptables para este régimen, la zona de la garganta muestra una línea de transición mayor a la supersónica en la que el cambio de estos parámetros es radicalmente mayor, este rango que se da en la sección crítica y permite que el flujo a pesar de aumentar su magnitud de velocidad siga siendo subsónico.

9. MÉTODOS DE VECTORIZACIÓN

Este pequeño capítulo se ha dedicado para definir los tipos de vectorización de la tobera. En este se explicarán las propuestas de análisis para vectorización del flujo y se mostrarán 4 casos de posicionamiento de las diferentes partes de la tobera, para obtener la componente de vectorización requerida.

En capítulos subsiguientes se nombrarán, analizarán y compararán los diferentes tipos de mecanismos de actuación de la tobera para los dos regimenes, supersónico y subsónico.

En una primera aproximación se pueden postular los siguientes tipos ideales para producir el efecto de vectorización.

NOTA: Se tiene que resaltar que los esquemas que se presentarán en este capítulo a continuación no se encuentran dimensionados, solo se toman para caso de ilustración y como ejemplos.

9.1 MOVIMIENTO INTERNO DE LAS SECCIONES CONVERGENTE Y DIVERGENTE (TIPO 1)

Con respecto a este tipo de sistema de movimiento, este realizará una actuación interna, esto quiere decir que, las láminas o aletas que conforman la tobera se moverán de forma independiente, pivotando por un lado en la zona superior e inferior de unión de la tobera con el post-quemador, y por el otro lado, pivotando en la sección superior e inferior también, donde está ubicada la garganta de la tobera (ver figura 33).

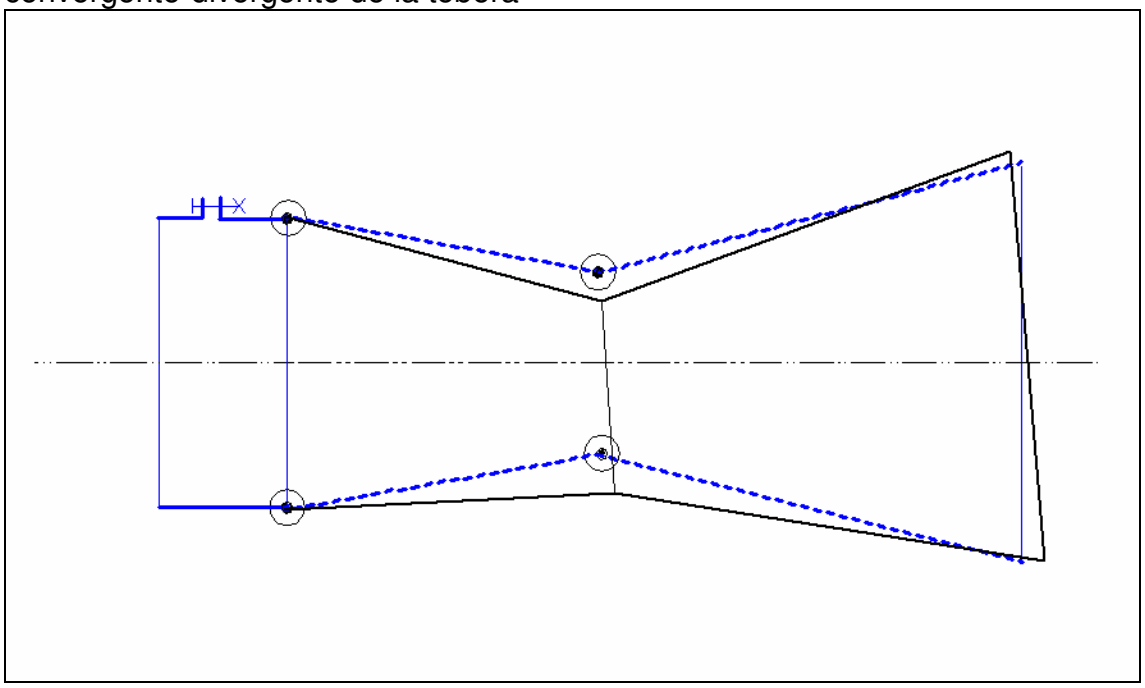
El movimiento será realizado a través de algunos actuadores (hidráulicos o neumáticos) que serán conectados o enganchados a los soportes o guías de las distintas láminas de la tobera, permitiendo generar el movimiento de la misma para producir el ángulo que sea necesitado según el requerimiento de vectorización.

Este método de vectorización fue mostrado esquemáticamente por el autor Jack Mattingly como “un esquema típico de una tobera vectorial bi – dimensional con reversibles”[10].

En algunos casos la disposición de los actuadores puede variar de configuración, cuando se habla de disposición se refiere a la ubicación y número de actuadores utilizados. Para este caso se pueden tener dos configuraciones:

- La primera configuración es la posibilidad de utilizar dos actuadores, cada uno ubicado en cada aleta.

Figura 33. Esquema de vectorización tipo 1, movimiento interno parte convergente-divergente de la tobera



Diseño del autor

- La segunda configuración del sistema podría ser un actuador, más un sistema de enganche que estaría unido al sistema del pistón del actuador, realizando la función de otro actuador, esto quiere decir que cuando el vástago del cilindro se extiende también se extenderá el enganche debido al sistema

[10] Mattingly, Op. cit 4., p. 806.

de unión al vástago, sin embargo esto requiere un análisis aún más complejo para que se cumplan con las condiciones de geometría durante la vectorización.

Prácticamente las configuraciones 1 y 2 realizan la misma función, con el mismo nivel de efectividad, pero se ha observado desde el punto de vista de reducción de componentes, menor peso y sincronización, el sistema de configuración número dos (2), ya que presenta mayores ventajas que el otro sistema, esto, debido a que se estaría reduciendo un componente que representa un aumento en el peso y un mayor estudio en la sincronización del sistema.

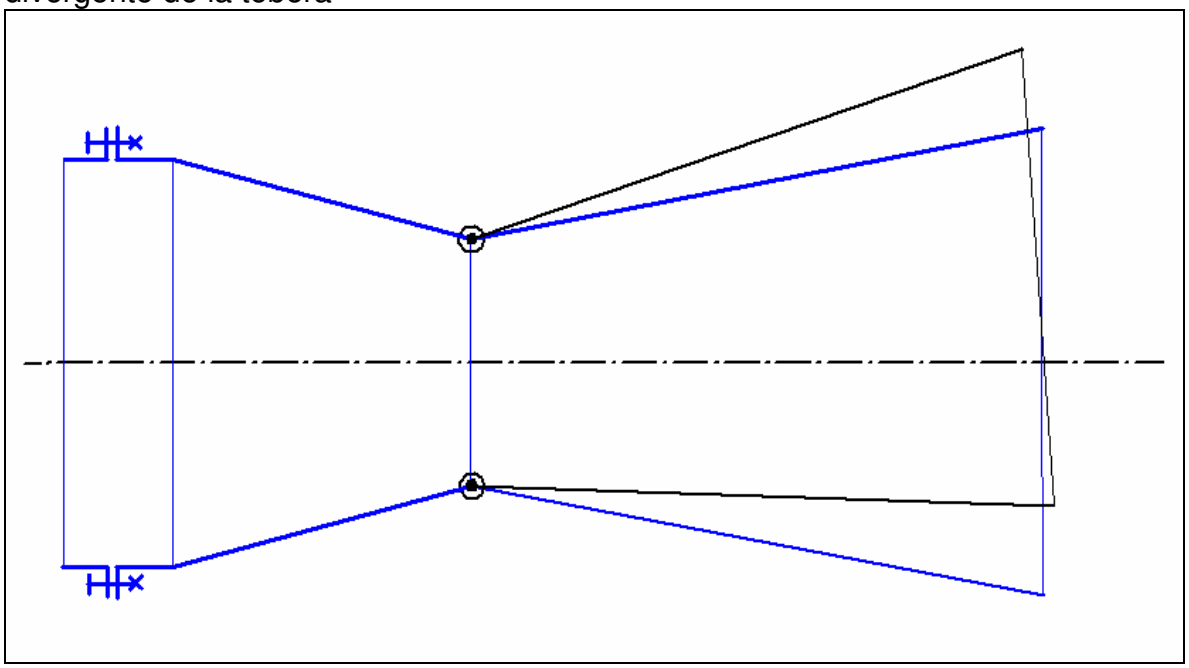
9.2 MOVIMIENTO ÚNICO DE LA SECCIÓN DIVERGENTE (TIPO 2)

Este tipo de sistema de movimiento, realizará su actuación de forma interna pero con la excepción de que la parte interna convergente será fija, mientras que la parte divergente estará pivotando en la parte superior e inferior de la garganta de la tobera, permitiendo así, que la componente de vectorización sea producida únicamente por la variación en la posición de la sección divergente (ver figura 34). De esta manera, se variará la posición de la misma para obtener el ángulo de vectorización que sea necesitado.

Para este caso el movimiento será realizado por medio de actuadores. Los actuadores que conciernen a este caso, serán ubicados en la sección media de la lámina convergente, la cual servirá como soporte estructural de los mismos. Para este caso solamente se tendrá en cuenta un único tipo de configuración donde actuará un solo actuador, el cual, sería el único encargado de realizar la tarea de transmitir el movimiento a la sección correspondiente.

Con respecto al modelo anterior, este tipo presenta ventajas en su practicidad, ya que se estaría presentando una mayor facilidad en la actuación debido al movimiento único de la sección divergente mientras que en el otro modelo se estaría movimiento las dos secciones. Además de esto, se reduciría notablemente la cantidad de componentes a utilizar en el sistema lo que generará una importante reducción al peso del equipo total. Otra ventaja que tiene este modelo con respecto al anterior es que presenta grados de movilidad que se requieran sin que se tenga que estar sujeto a la variación de la otra sección, lo cual proveerá independencia de movimiento al sistema en general.

Figura 34. Esquema de vectorización tipo 2, movimiento interno parte divergente de la tobera



Diseño del autor

9.3 MOVIMIENTO TOTAL EXTERNO DE LA TOBERA (TIPO 3)

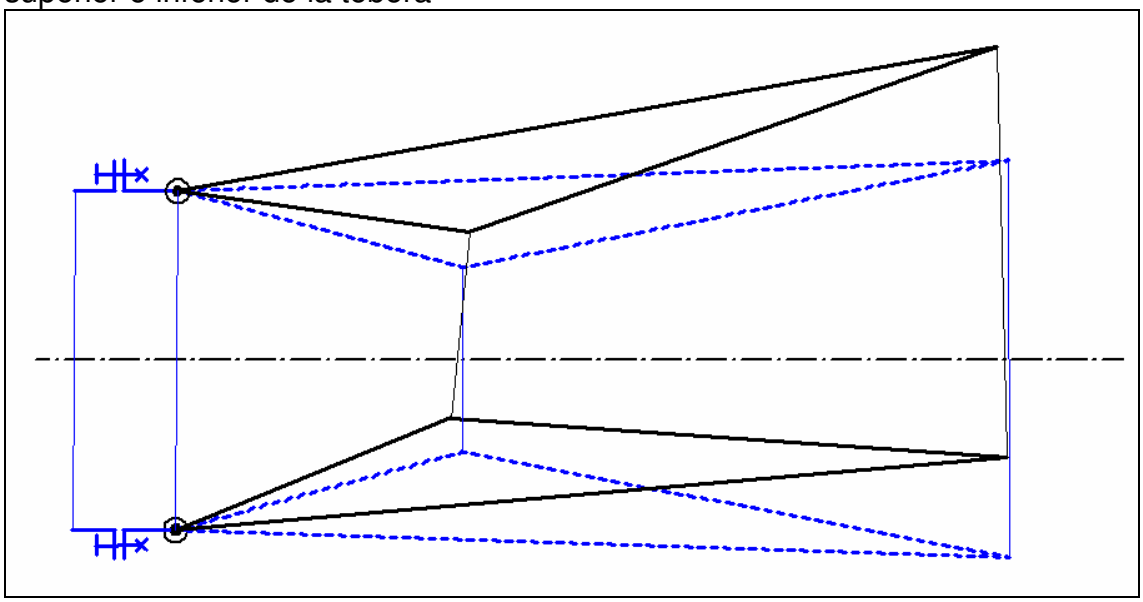
Este tipo de movimiento que se presenta a continuación tiene un concepto totalmente diferente a los anteriores, en este caso se realizará un movimiento de forma externa total, la tobera estará pivotada en la parte de unión de la misma con el post-quemador. Estos pivotes estarán ubicados en la parte superior e inferior del conjunto de la tobera y permitirán que sus láminas superior e inferior respectivamente se muevan proporcionalmente una con la otra generando el ángulo de vectorización requerido (ver figura 35).

Con respecto a los dispositivos de actuación, se tendrán en cuenta de nuevo los actuadores (hidráulicos o neumáticos), este tipo de actuadores se ubicarán en la sección del cajón de unión con la estructura del post - quemador. Esta ubicación sobre la lámina del cajón para el actuador depende de dos configuraciones:

- La primera configuración es la utilización de un solo actuador que pueda satisfacer el movimiento adecuado, superando sin problemas la fuerza que ejerce la tobera y el flujo para poder moverse. La ubicación del actuador puede

variar ya que se tiene que seleccionar una posición óptima sobre una estructura fija ya sea del post – quemador o del componente completo de la tobera.

Figura 35. Esquema de vectorización tipo 3, movimiento total externo láminas superior e inferior de la tobera



Diseño del autor

- La segunda configuración sería la utilización de dos actuadores hidráulicos ubicados simétricamente sobre la misma parte fija de la estructura mencionada anteriormente, esto con el fin de que el trabajo realizado por los actuadores sea el mínimo y que los esfuerzos que vayan a generarse sobre los mismos sean de la menor magnitud posible. Sin embargo, esto traería como consecuencia un incremento en el peso del sistema y aumentaría el número de componentes del mismo.

9.4 MOVIMIENTO TOTAL EXTERNO DE LA TOBERA DE CAJÓN PIVOTADO EN EL MEDIO (TIPO 4)

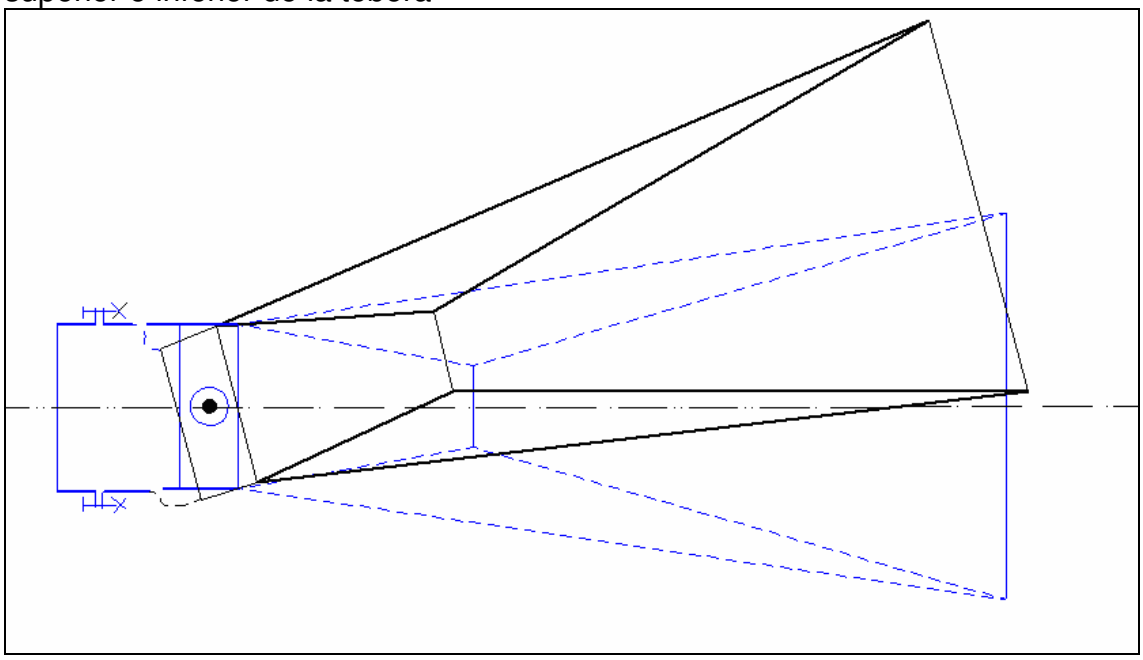
Este esquema de vectorización que se presenta a continuación posee un concepto similar al caso anterior, cuando se dice similar, se refiere a que la tobera se moverá de forma externa completamente con la diferencia que se variará la ubicación de los pivotes. Este caso esta compuesto por dos cajones, uno exterior y otro interior. La parte interior se centrará a funcionar únicamente como punto de pivote y punto de fijación del sistema con el post-quemador,

mientras que la parte externa será la parte del cajón que contará internamente con la forma de la tobera laval (convergente – divergente) y pivotará unida a la estructura del post – quemador como sea requerido (ver figura 36).

Con respecto a los dispositivos de actuación se asumirán de igual manera lo propuesto en el caso anterior, debido a que el movimiento conserva el mismo concepto, por ende el análisis de las configuraciones es el mismo.

En la figura 36 se presenta la sección de unión de las cajas con unas dimensiones pequeñas, las cuales se muestran así únicamente con el fin de mostrar la forma en conjunto, para el caso real la caja exterior llevaría las medidas reales de la tobera supersónica, mientras que la caja interna, representaría el conjunto del post-quemador.

Figura 36. Esquema de vectorización tipo 4, movimiento total externo láminas superior e inferior de la tobera



Diseño del autor

Este esquema tendría una buena viabilidad, ya que facilitaría la utilización de actuadores. Por otro lado, entre las desventajas que se podrían presentar estaría el tamaño, ya que tendrá que se necesitaría un mayor espacio para ensamblar el sistema total, lo cual afecta las condiciones de costos y eficiencia del componente.

10. ESTUDIO TEÓRICO TERMOGASODINAMICO DE LOS MÉTODOS DE VECTORIZACIÓN

Como se pudo observar anteriormente el análisis por medio del programa CFD permite tener una herramienta muy exacta con respecto al análisis teórico propuesto por la metodología que se está desarrollando. De esta manera, a continuación se mostrará, en función de los parámetros calculados, el comportamiento del flujo para los diferentes regimenes propuestos durante operación normal y en los diferentes ángulos de vectorización, 5, 10 y 15 grados respectivamente.

Para cada caso se analizará el comportamiento del flujo con respecto a las variaciones de velocidad en la salida de la tobera y presión estática. Adicional a esto se busca plantear una solución para la variación de la velocidad a la salida, teniendo en cuenta únicamente el sistema que tenga un funcionamiento más efectivo.

NOTA: El Enmallado utilizado y su respectivo dimensionamiento fue realizado experimentalmente hasta que se obtuvieran los resultados más apropiados, teniendo en cuenta la capacidad del equipo y los parámetros de diseño calculados previamente.

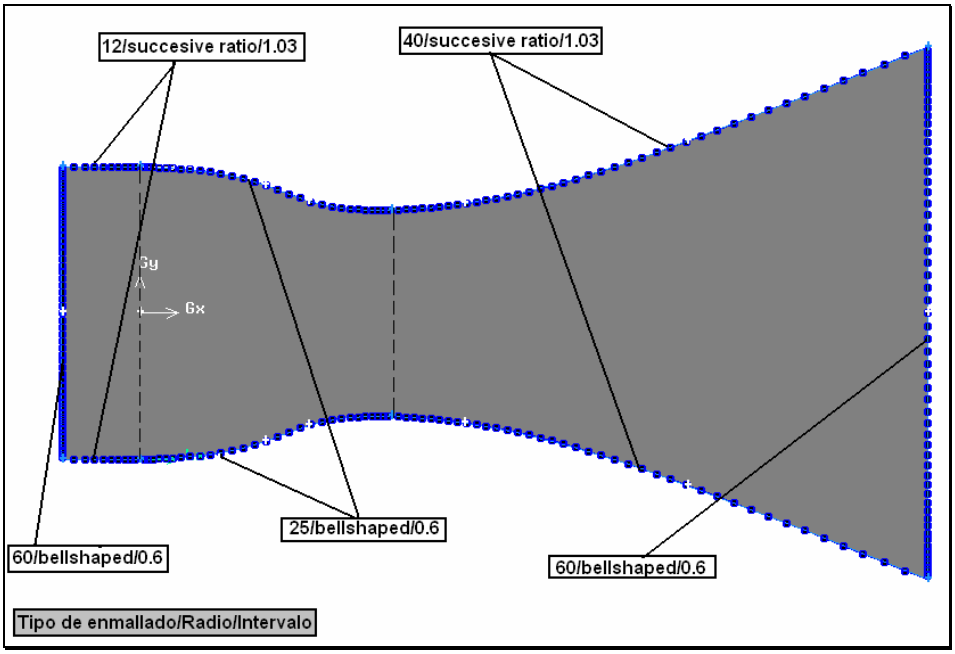
10.1 VECTORIZACIÓN EN RÉGIMEN SUPERSÓNICO

A continuación se mostrarán los análisis a los 4 casos presentados en el capítulo 9. A partir de ellos, en una primera instancia se mostrará la distribución de algunos parámetros termogasodinámicos en régimen supersónico, para observar la posibilidad de llegar a una conclusión sobre la cual se pueda formular una función que exprese la variación de su comportamiento.

El análisis en el programa Fluent se realizó para todos los casos de vectorización en régimen supersónico teniendo en cuenta los siguientes datos:

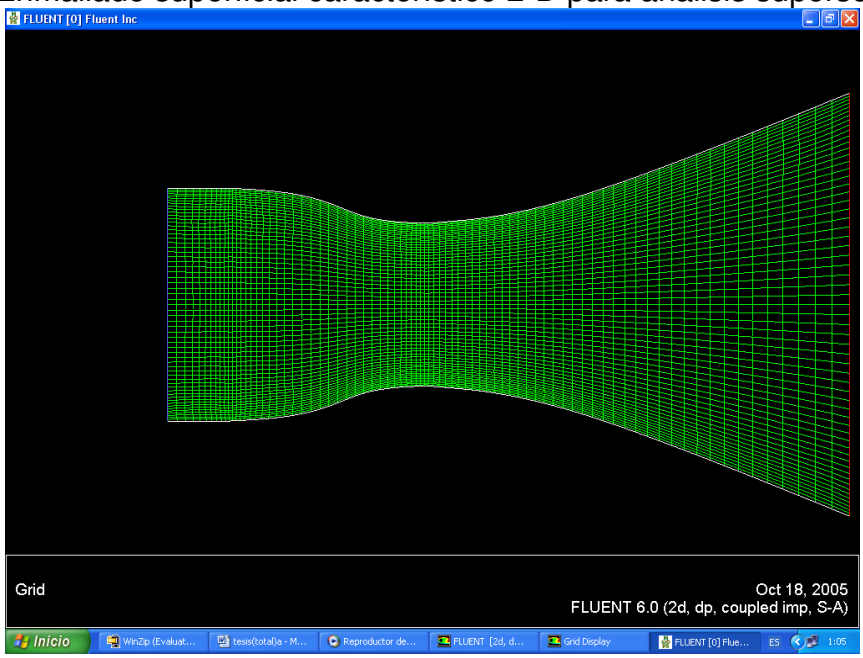
- Solucionador: Método acoplado implícito para flujo estable

Figura 37. Enmallado lateral característico 2-D para análisis supersónico posicionamiento de los nodos



Diseño del autor

Figura 38. Enmallado superficial característico 2-D para análisis supersónico



Programa CFD FLUENT 6,2 3-D

Análisis 2-D: Se exportará un esquema con las dimensiones reales calculadas previamente el enmallado característico se muestra en las figuras 37 y 38.

El enmallado de la cara lateral de la tobera fue hecho bajo los siguientes parámetros:

- Tipo de elementos en el enmallado: cuadrado/triangular.
- Tipo de enmallado: Mapa.

Adicional a lo anterior, la figura 37 muestra información relevante al posicionamiento de los nodos y sus características de creación.

- Ecuaciones de Euler.

- Ecuación de la Conservación de la Energía.
- Ecuación de la Conservación de la Masa.
- Ecuación de la Conservación de Momento.

- No se asume análisis de intercambio de calor (es un tema que no está contemplado en este proyecto).

10.1.1 Visualización de los diferentes modelos de vectorización para régimen supersónico.

10.1.1.1 Vectorización para el modelo tipo 1. En las figuras 41 y 42 se mostrarán la variación del perfil de velocidad en términos del Número de Mach y la presión estática respectivamente, a medida que el ángulo de vectorización varía.

Con respecto a los resultados arrojados por la grafica 41, cuando se encuentra en posición normal, el flujo tiene un comportamiento estable a lo largo de la sección, esto quiere decir, que es menor a la entrada y mayor a la salida con un perfil de aumento constante.

El comportamiento de los parámetros de Número de Mach para este caso, muestran que no existe una gran variación al pasar de 0º a 15º (ver tabla 3), los valores obtenidos en la simulación indican que los valores máximos se dan a un ángulo de 15º. La zona crítica de garganta mantiene valores aproximados a 1, acercándose así a la mayor eficiencia de la tobera a pesar de la vectorización.

Cuando se evalúa la distribución de presión estática como lo muestra la grafica 42, se presenta en posición normal un contorno uniforme en donde se tiene una mayor presión a la entrada y disminuye hasta obtener su mínimo valor en la salida. En el caso donde es vectorizado a un ángulo determinado el perfil de distribución de presión estática tiene un cambio constante y gradual principalmente localizado en la garganta de la tobera, la cual en función del ángulo varía en gran proporción el comportamiento del flujo en esta sección, este cambio localizado genera cambios importantes en la distribución interna del flujo, lo cual afecta el nivel de eficiencia de vectorización.

10.1.1.2 Vectorización para el modelo tipo 2. En las figuras 43 y 44 se mostrarán la variación del perfil de velocidad en términos del Número de Mach y la presión estática respectivamente, a medida que el ángulo de vectorización varía.

El perfil de velocidades mostrado en la figura 43 es muy similar al caso anterior debido a que en posición normal (cero grados de vectorización) se comporta de forma uniforme y cuando es vectorizado, la irregularidad del flujo se presenta en la zona próxima a la garganta donde se observan una serie perfiles de velocidad inconstantes que se producen como efecto del método de vectorización utilizado. Estas variaciones al igual que en el caso anterior desplazan la posición del Mach critico (M = 1) hacia la salida variando enormemente el perfil de velocidades interno por efecto del método de vectorización.

Para el caso donde se evalúa en términos de presión estática (figura 44), las características de comportamiento del flujo son totalmente proporcionales, ya que la distribución de los parámetros dinámicos se comporta de la misma forma que los parámetros estáticos, con las mismas irregularidades en la zona próxima a la garganta, estas variaciones es muy importante tenerlas en cuenta, ya que son las que principalmente generan perdidas internas dentro del sistema.

10.1.1.3 Vectorización para el modelo tipo 3. En las figuras 44 y 45 se mostrarán la variación del perfil de velocidad en términos del Número de Mach y la presión estática respectivamente, a medida que el ángulo de vectorización varía.

En la figuran 44 se puede considerar que tanto para el caso en donde la tobera se encuentra en posición normal y cualquier posición vectorizada, el perfil de velocidad es muy constante y regular, con la única apreciación característica que las principales variaciones se dan en la sección inmediata a la garganta en donde se producen cambios del perfil de distribución que generan pequeñas irregularidades locales.

Con respecto a la figura 45 la distribución de presión presenta las mismas características, este tipo presenta una regularidad y distribución constante sobre la tobera internamente, con la presencia de algunas variaciones dentro de los extremos en la entrada del flujo de la tobera por efecto del tipo de vectorización utilizado. Estas variaciones locales se generan en principalmente en la parte inferior de la sección de la garganta de la tobera.

10.1.1.4 Vectorización para el modelo tipo 4. En las figuras 46 y 47 se mostrarán la variación del perfil de velocidad en términos del Número de Mach y la presión estática respectivamente, a medida que el ángulo de vectorización varía.

En la figura 46 se puede observar que el perfil es aún mucho más fino y regular que en la caso tipo 3. Las principales variaciones se muestran igualmente en el extremo superior de la parte convergente de la tobera y se originan principalmente por el cambio brusco de dirección del flujo, lo cual es originado primeramente por causa del método de vectorización utilizado. Esta variación es muy pequeña, cerca del 2% y únicamente afecta la sección convergente superior, la sección restante de la tobera se caracteriza por su alta uniformidad en la distribución del flujo para los ángulos de vectorización correspondientes.

Lo mismo sucede para el caso de la figura 47, el perfil de presión interna estática es mucho mas estable cambiando de manera gradual, pero con la característica que en la zona inicial convergente se encuentra esos cambios localizados en el perfil de presión, debido a la vectorización realizada y al tipo de movimiento. La distribución en general es muy buena ya que garantiza las menores pérdidas internas por el movimiento y expansión del flujo.

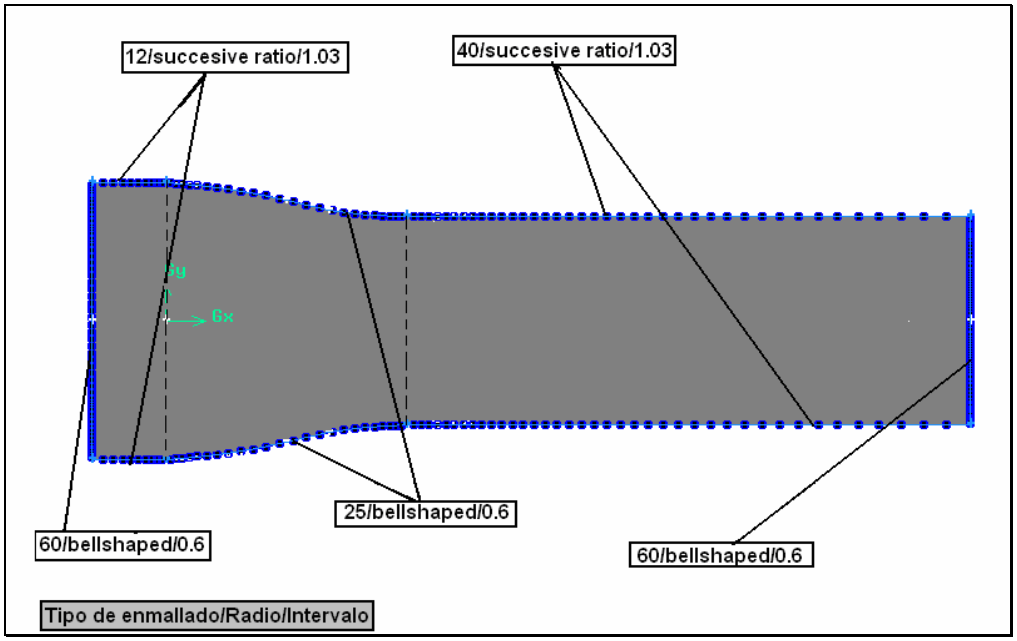
10.2 VECTORIZACIÓN EN RÉGIMEN SUBSÓNICO

El análisis en el programa Fluent se realizó para todos los casos (vectorización en régimen supersónico y subsónico) teniendo en cuenta los siguientes datos:

- Solucionador: Método acoplado implícito para flujo estable

Análisis 2-D: Se exportará un esquema con las dimensiones reales calculadas previamente el enmallado característico se muestra en las figuras 39 y 40.

Figura 39. Enmallado lateral característico 2-D para análisis subsónico posicionamiento de los nodos



Diseño del autor

El enmallado de la cara lateral de la tobera fue hecho bajo los siguientes parámetros:

- Tipo de elementos en el enmallado: cuadrado/triangular.
- Tipo de enmallado: Mapa.

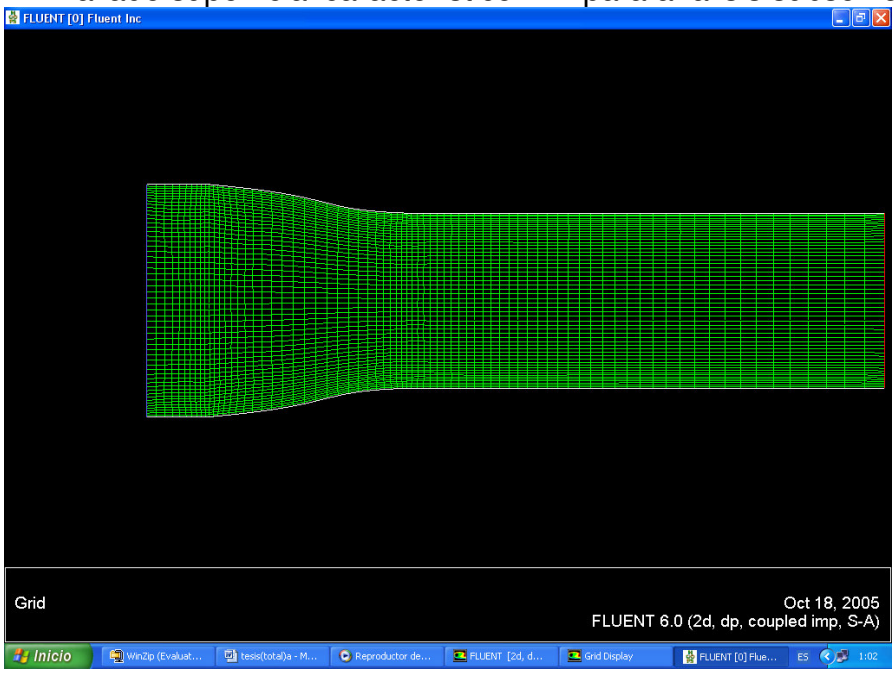
Adicional a lo anterior, la figura 39 muestra información relevante al posicionamiento de los nodos y sus características de creación.

- Ecuaciones de Euler.

- Ecuación de la Conservación de la Energía.
- Ecuación de la Conservación de la Masa.
- Ecuación de la Conservación de Momento.

- No se asume análisis de intercambio de calor (es un tema que no está contemplado en este proyecto).

Figura 40. Enmallado superficial característico 2-D para análisis subsónico



Programa CFD FLUENT 6,2 3-D

10.2.1 Visualización de los diferentes modelos de vectorización para régimen subsónico.

10.2.1.1 Vectorización para el modelo tipo 1. En las figuras 49 y 50 se mostrarán las variaciones del perfil de velocidad y presión estática respectivamente, a medida que el ángulo de vectorización varía.

Para el caso de la figura 49, se puede observar que en la posición normal donde no se encuentra vectorizada la tobera, el flujo de gas es acelerado en la sección del tubo recto, mientras que en la zona convergente, el cambio de la velocidad es menor debido a que progresivamente el gas aumenta su velocidad hasta alcanzar la requerida en la garganta (M = 1).

Cuando la tobera es vectorizada se puede observar que los parámetros de velocidad en la zona convergente permanecen estables, por otro lado, en la zona de la garganta se observa un salto de velocidad alto; es una zona localizada de forma normal a la superficie que se puede interpretar como saltos generados por ondas de choque que tienden a ser mas pronunciadas cuanto mayor es el ángulo de vectorización, las ondas de choque producidas son oblicuas y se generan en la sección del tubo recto.

Evaluando la presión estática (figura 50), sucede el caso contrario a lo mencionado anteriormente, ya que la presión es mayor en la zona convergente y desde la zona de la garganta en adelante se tiene una disminución del flujo debido al comportamiento de este sobre la geometría de paso, con la misma similitud que al vectorizar la tobera se presentan los saltos de presión que se acentúan con mayor grado a medida que se incrementa el ángulo de vectorización generando las mencionadas ondas de choque.

10.2.1.2 Vectorización para el modelo tipo 2. En las figuras 51 y 52 se mostrarán la variación del perfil de velocidad en términos del Número de Mach y presión estática respectivamente, a medida que el ángulo de vectorización varía.

Con respecto a la información que arroja la grafica 51 en donde se evalúa la velocidad en términos del Número Mach, se puede observar que en estado inicial la velocidad mínima se presenta en la zona convergente hasta el punto donde el flujo llega a la garganta, luego, este empieza acelerarse de forma continua hasta obtener su valor máximo en la salida; a medida que se vectoriza presentan algunos puntos donde la velocidad alcanza valores altos (velocidad supersónica M › 1) según la escala de colores y que se van haciendo más grandes a medida que se incrementa el grado de vectorización, el tamaño de los mismos se incrementa hasta tener saltos de velocidad altos bastante pronunciados.

Según lo anterior se observa como se generan las ondas de choque, las cuales no son tan notables como en el método anterior, en este caso se producen

ondas que no son tan fuertes, permitiendo así que la velocidad se restablezca con mayor facilidad y alcance valores normales a la salida.

Para el caso en donde se evalúa en términos de presión estática (figura 52), en la posición normal, el cambio de los parámetros es gradual según las condiciones de la geometría. La presión es mayor en la zona convergente y va disminuyendo a medida que la geometría va cambiando. Cuando se vectoriza los saltos presión son aún más débiles, esto debido la enorme variación interna que tiene el flujo como consecuencia de la presencia de las ondas de choque, estas a su vez como se puede observar son función directa del ángulo de vectorización actual.

10.2.1.3 Vectorización para el modelo tipo 3. En las figuras 53 y 54 se mostrarán la variación del perfil de velocidad y presión estática respectivamente, a medida que el ángulo de vectorización varía.

Para el caso de la figura 53 se puede observar que la velocidad del flujo en la sección convergente se comporta de manera satisfactoria permitiendo que en este punto la velocidad sea baja y a medida que el flujo va pasando hacia la zona de la garganta, el flujo se acelera de manera adecuada llegando a obtener su mayor valor en la zona de la salida del tubo (M = 1).

Cuando la tobera se vectoriza a un ángulo determinado se puede observar que en la zona convergente se presenta una discontinuidad debido que esta parte es donde se inicia la vectorización y por ende se desestabiliza el flujo, produciendo esos saltos de velocidad pequeños pero continuos sobre la parte inferior de la tobera convergente. Después de que el flujo ha pasado por esta zona empieza a normalizarse a medida que este pasa por la garganta y la zona del tubo recto, se obtiene el mayor valor de velocidad en la salida del tubo recto (M = 1).

Para el caso de la figura 54 donde se muestran los resultados en función de la distribución de presiones estáticas, se tiene en la posición normal un comportamiento adecuado del flujo, en donde la presión máxima se localiza en la zona convergente y disminuye su magnitud hasta pasar a lo largo del tubo recto. Cuando la tobera es vectorizada presenta de igual forma un perfil relativamente estable pero con mayor presión en la zona inferior convergente, a diferencia del perfil de velocidades no se presentan esos saltos o alteraciones bruscas del flujo, sino un aumento de presión en esa zona más regular.

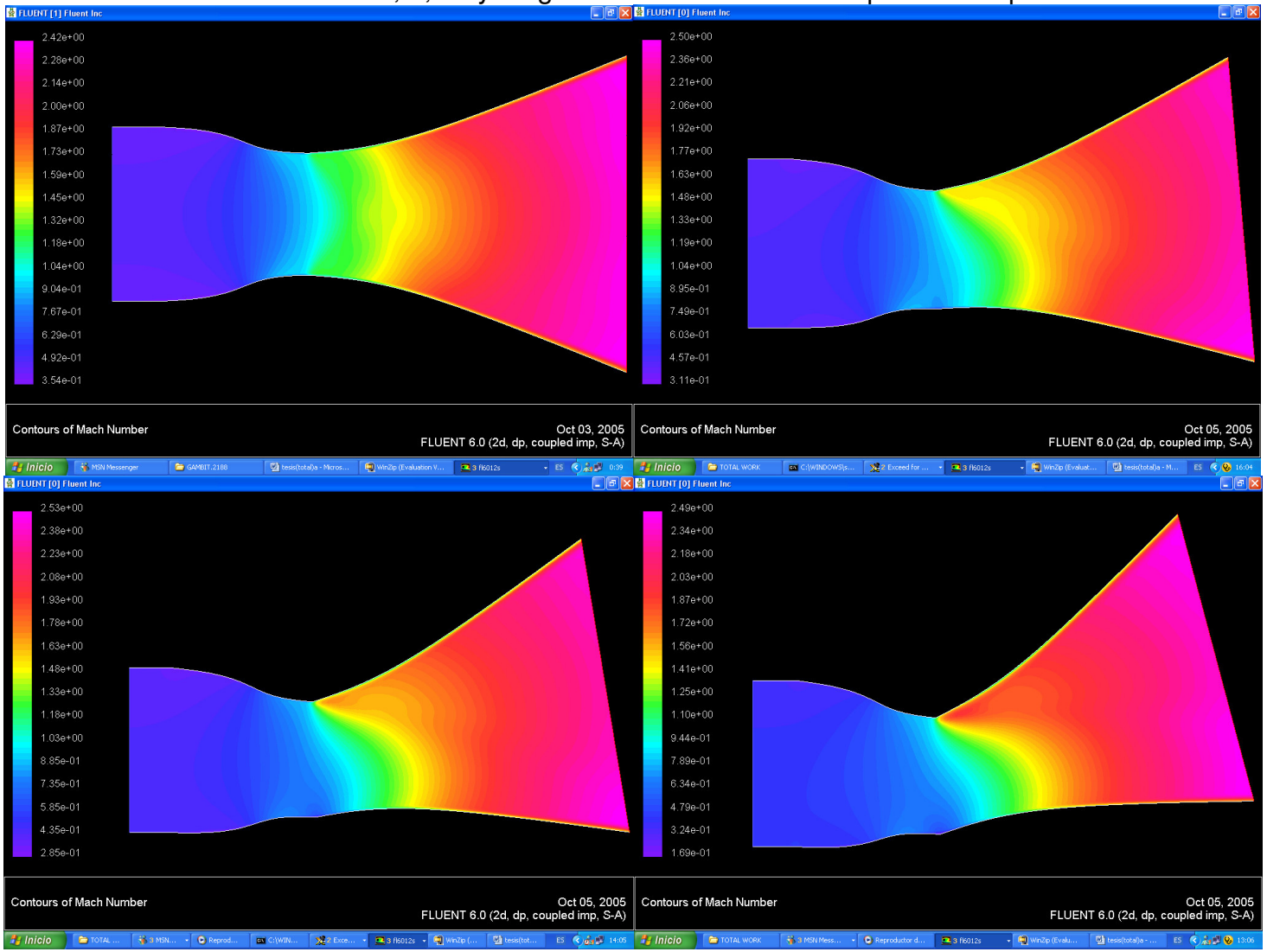
Es importante también evaluar que con respecto a los casos anteriores tipo 1 y 2 no hay presencia de saltos de velocidad ni de presión estática en la zona del tubo recto permitiendo concluir que este tipo no presenta ondas de choque y por ende es mucho mas estable el flujo en las condiciones de vectorización.

10.2.1.4 Vectorización para el modelo tipo 4. En las figuras 55 y 56 se mostrarán la variación del perfil de velocidad y presión estática respectivamente, a medida que el ángulo de vectorización varía.

Observando los resultados arrojados por la grafica 55 se puede observar que el flujo tiene un comportamiento similar al caso anterior, donde se presentan de nuevo saltos de velocidad pequeños pero continuos en la zona convergente de la tobera, debido al cambio que se produce al vectorizarse en ese punto. La diferencia más notable se observa cuando el flujo pasa por zona de la garganta y el tubo recto, ya que el perfil de velocidad tiene un cambio de manera más constante, hasta llegar a obtener el mayor valor de velocidad en la zona de la salida de la tobera (M = 1).

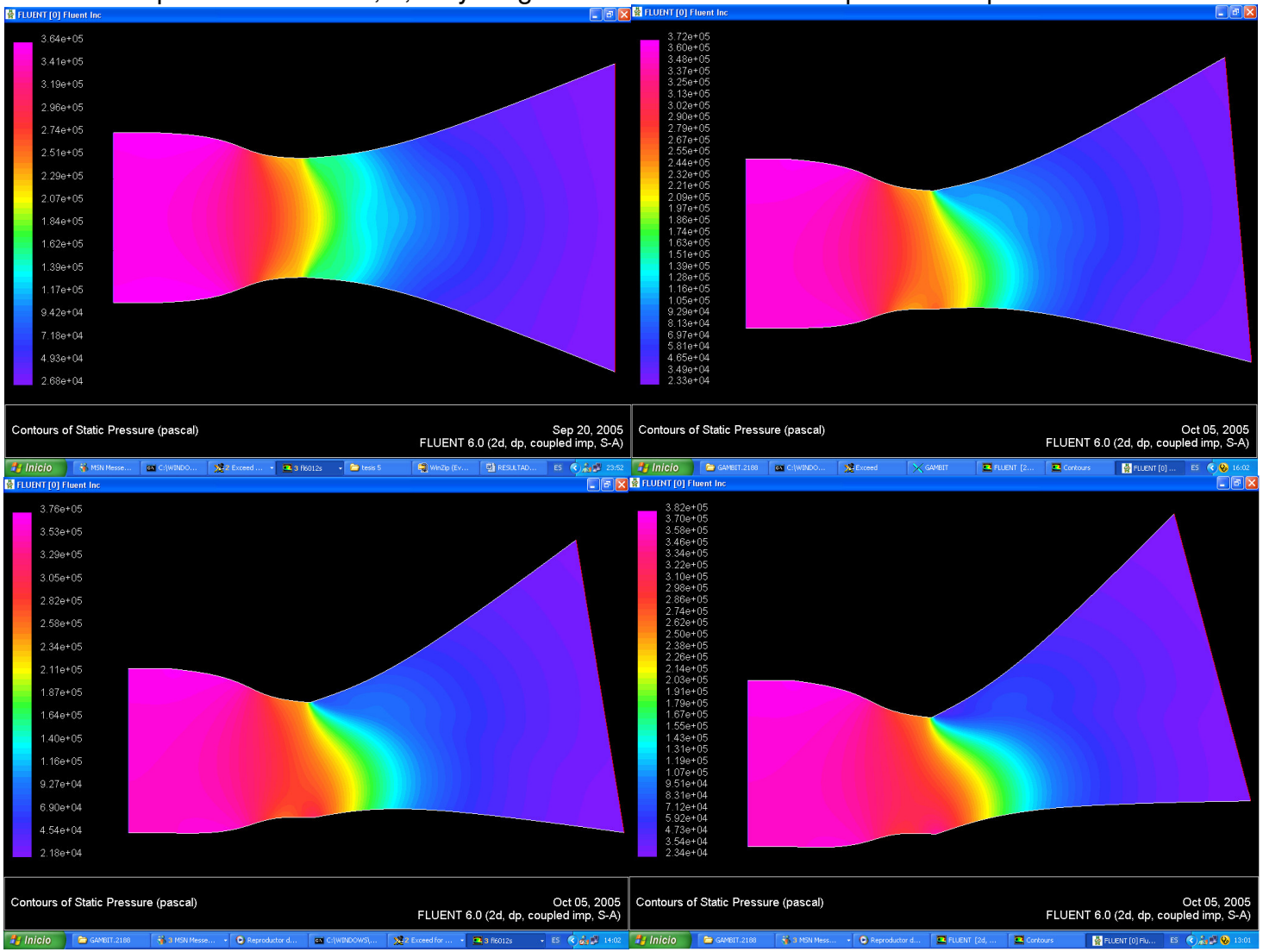
Por el otro lado, la figura 56 en donde es evaluado el comportamiento del flujo en términos de la distribución de presión estática, se tienen resultados bastante óptimos, debido a que la distribución es uniforme y continua, cuando la tobera es vectorizada no hay presencia de ondas de choque ni saltos presión notables, de tal forma que la vectorización no afecta la condiciones características del flujo, la presión es disminuida de forma gradual llegando a su valor mínimo a la salida de la tobera permitiendo así que cumpla su función de que el flujo se acelere de forma rápida y constante.

Figura 41. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 1



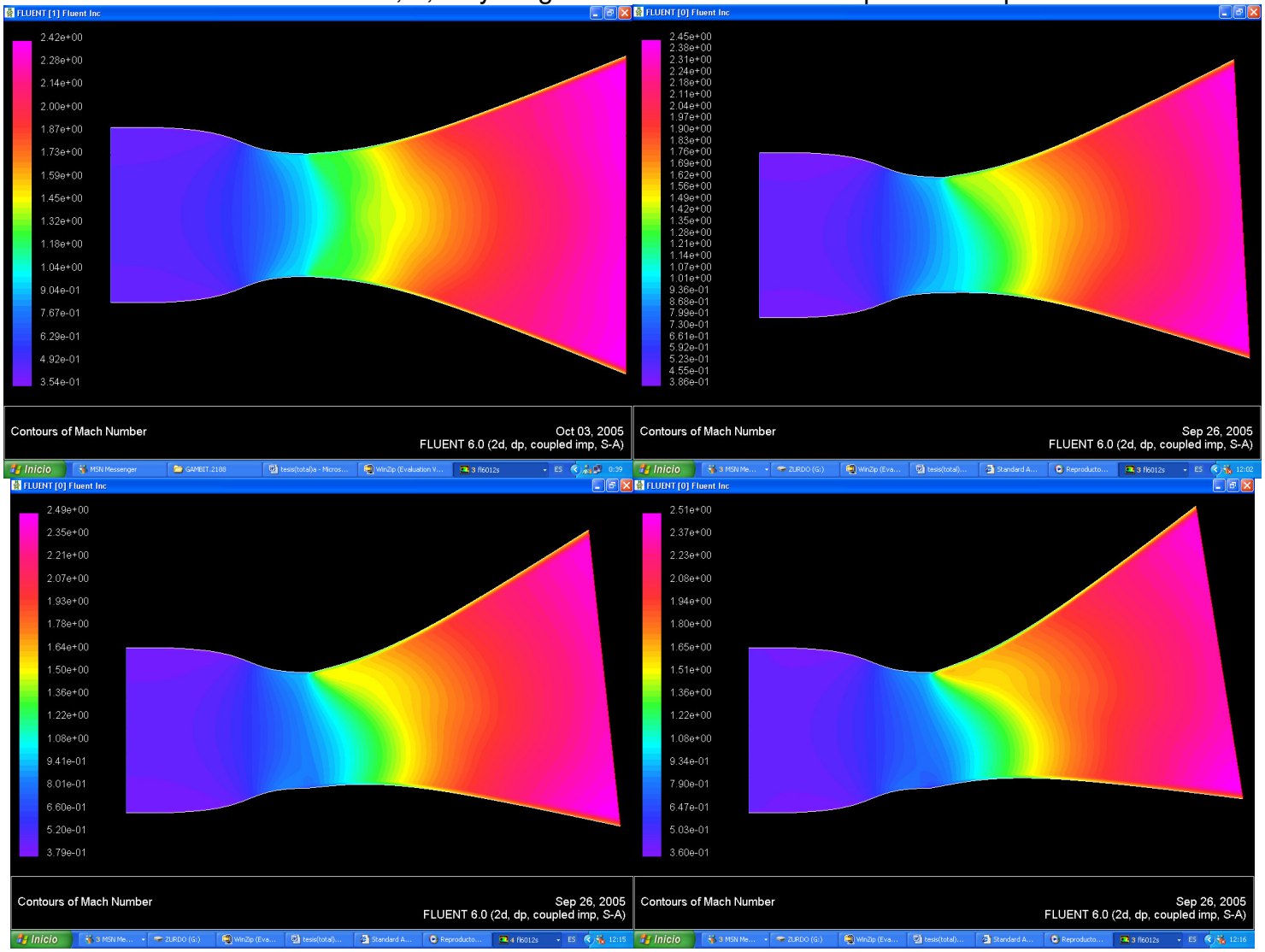
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 42. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 1



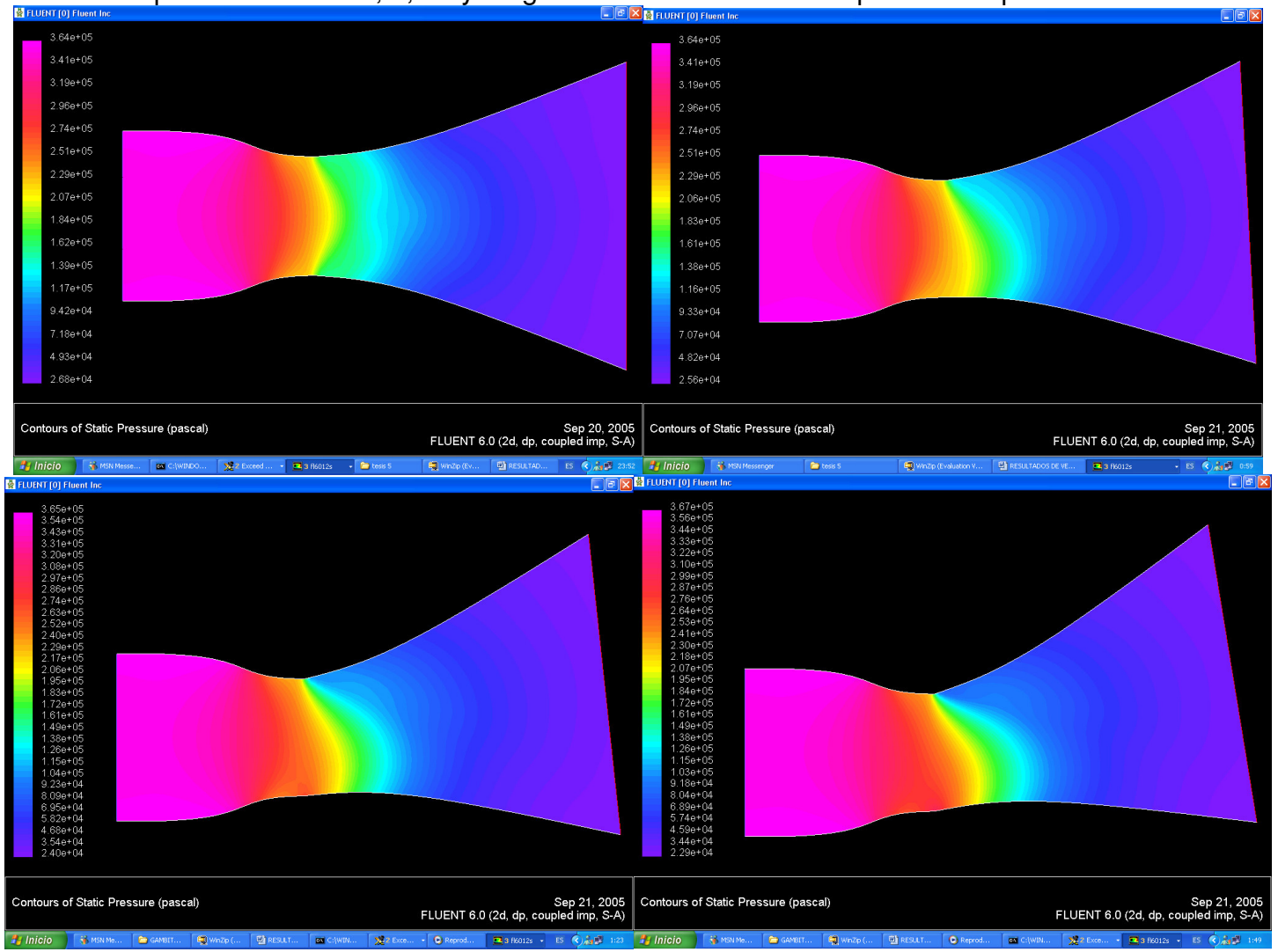
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 43. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 2



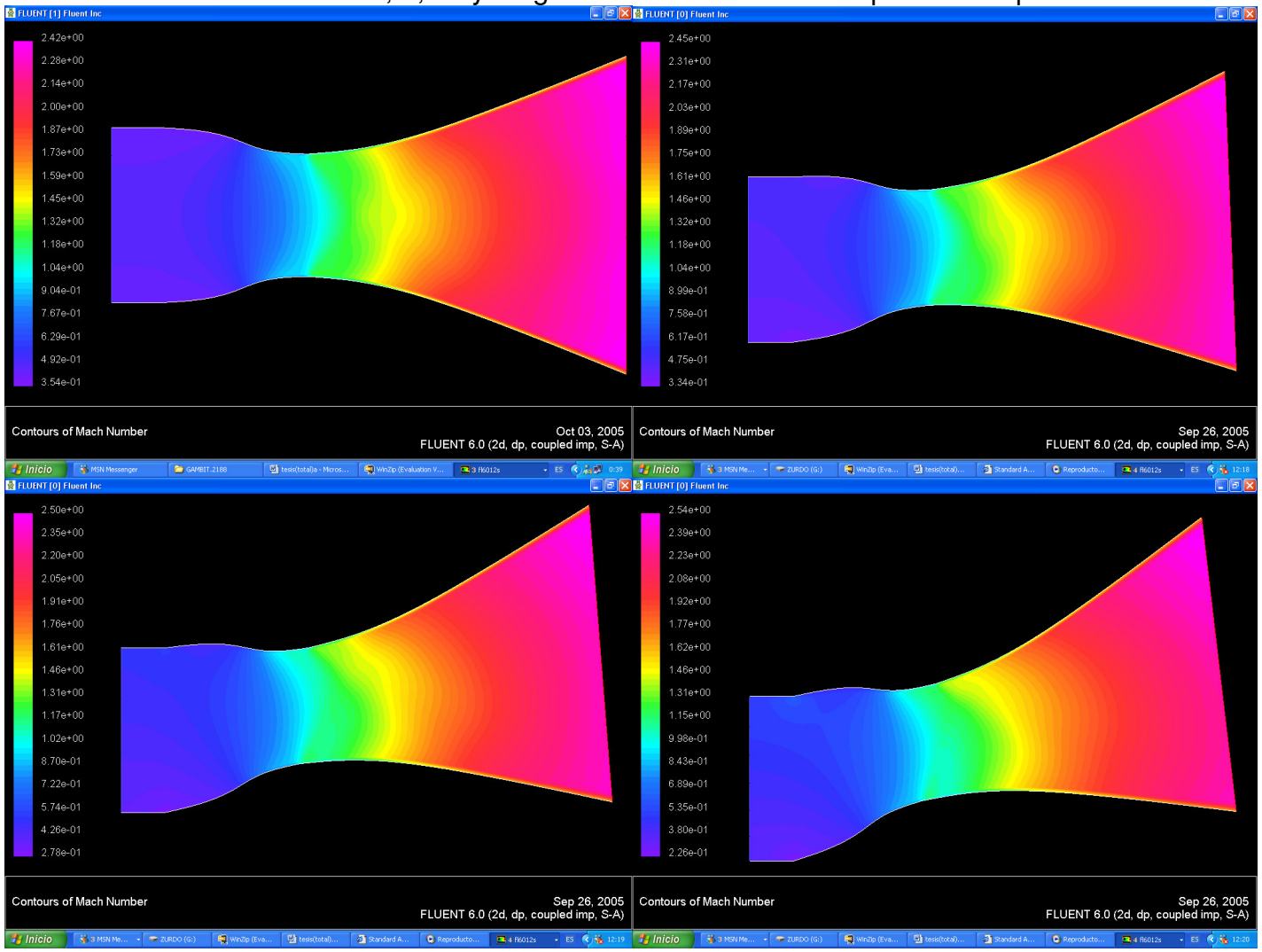
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 44. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 2



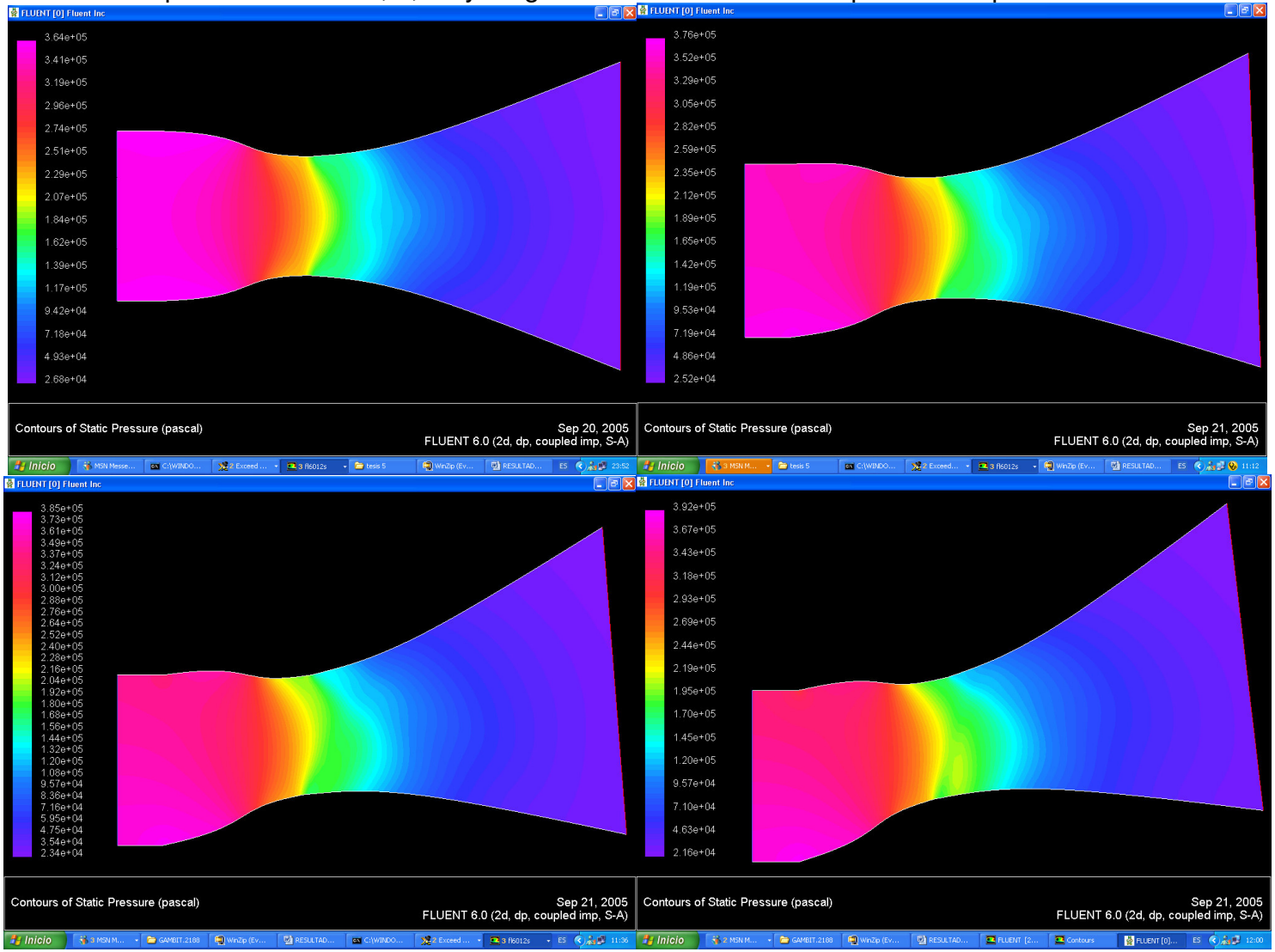
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 45. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 3



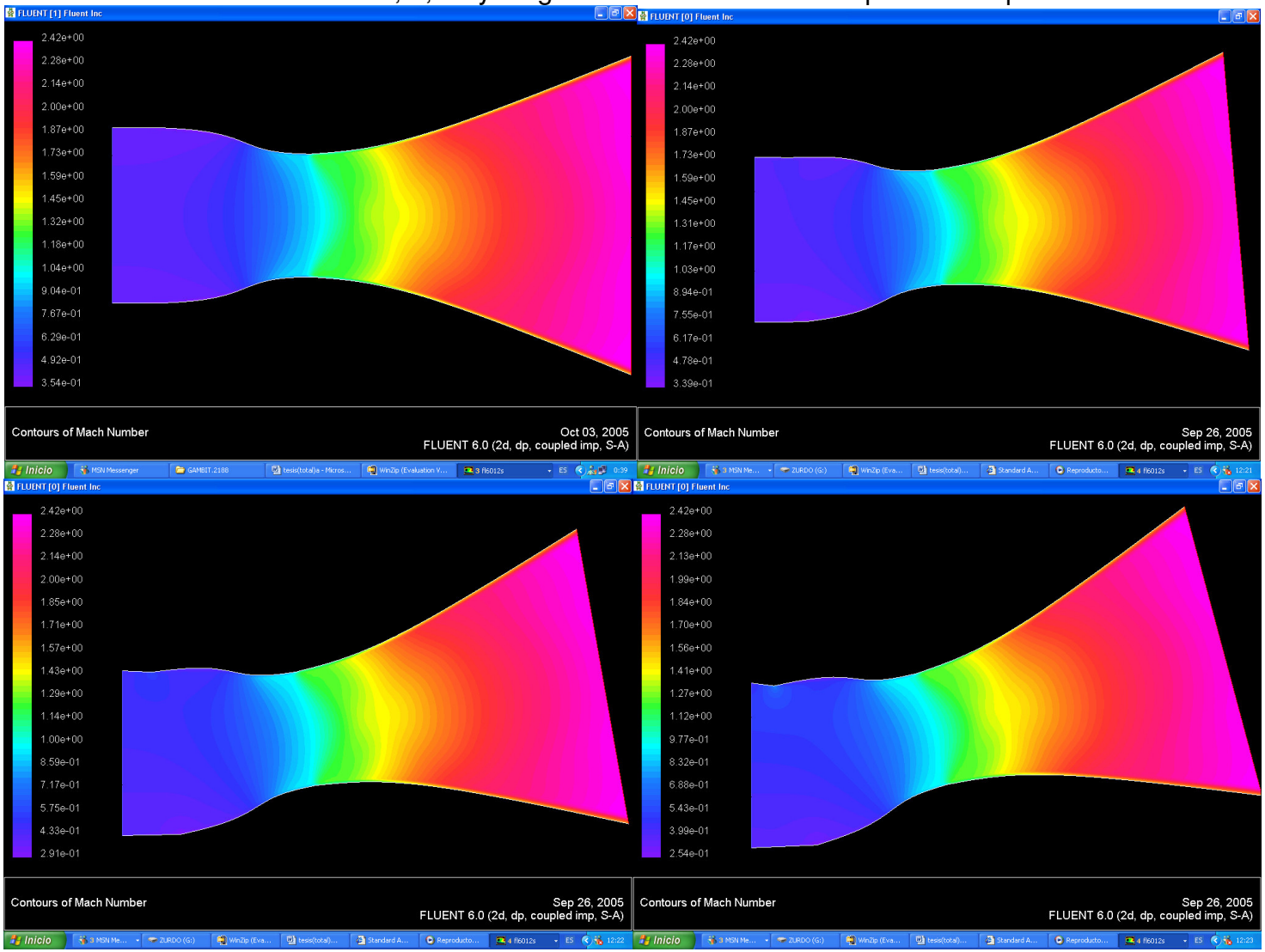
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 46. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 3



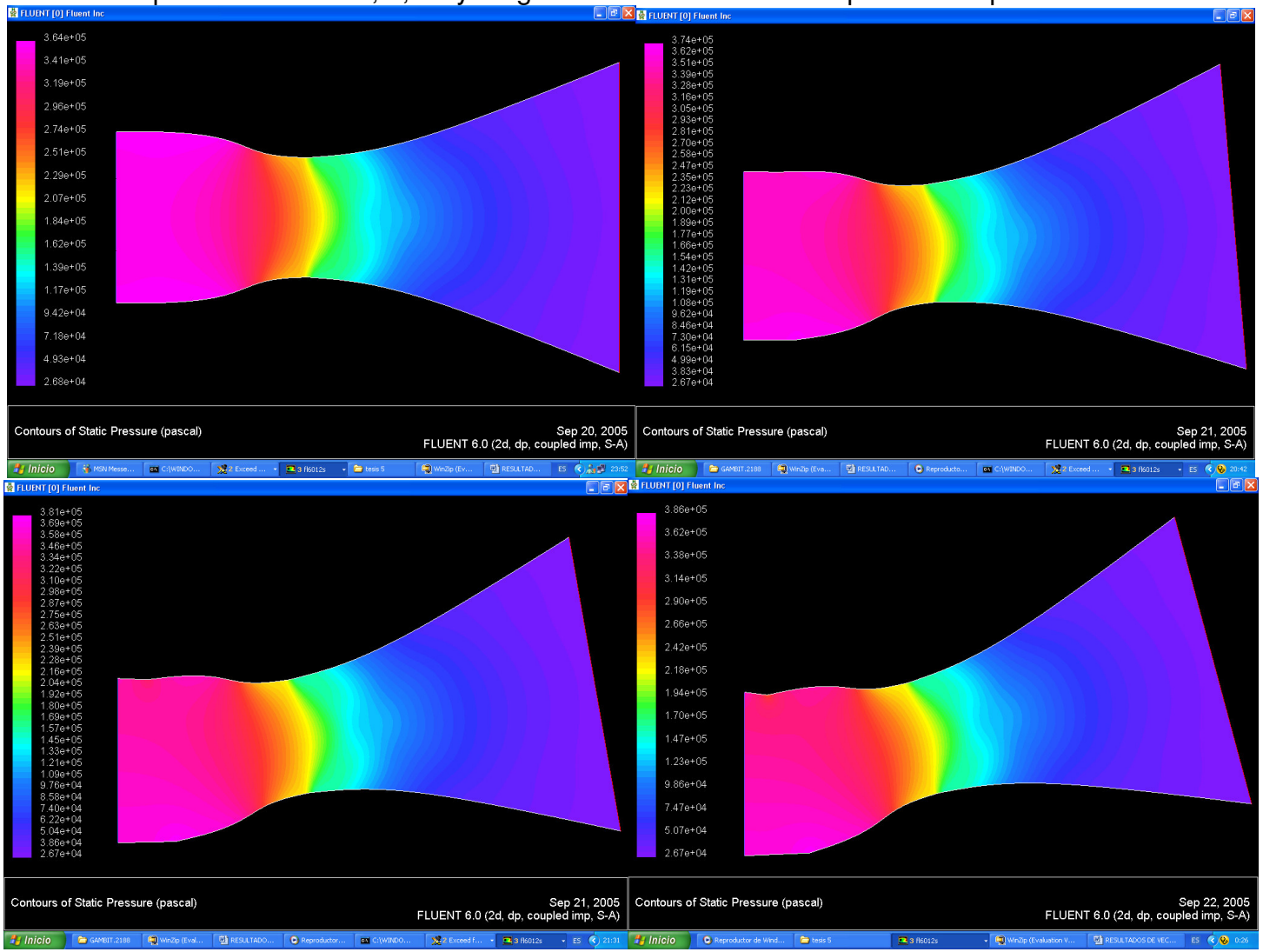
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 47. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 4



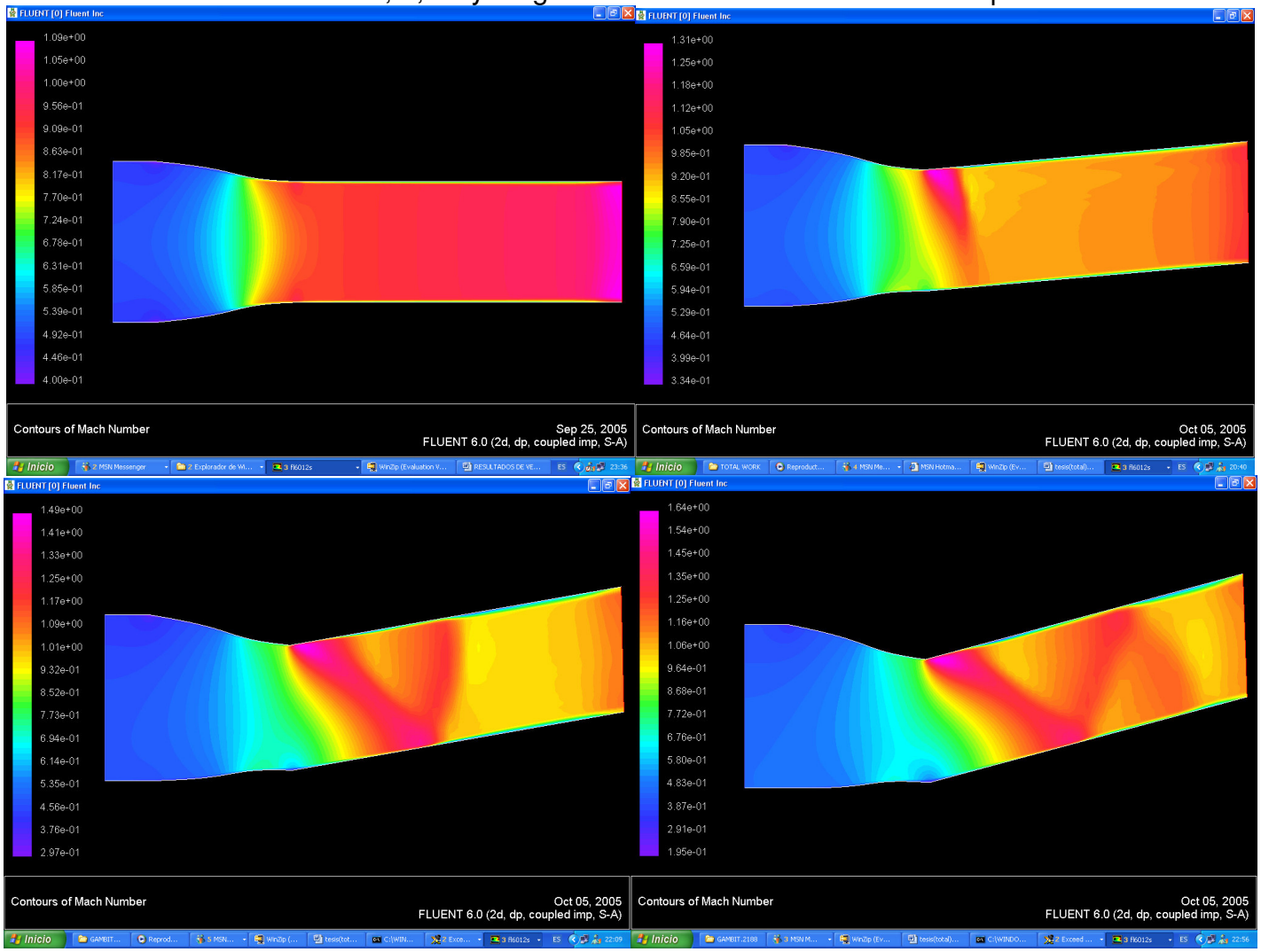
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 48. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización supersónico tipo 4



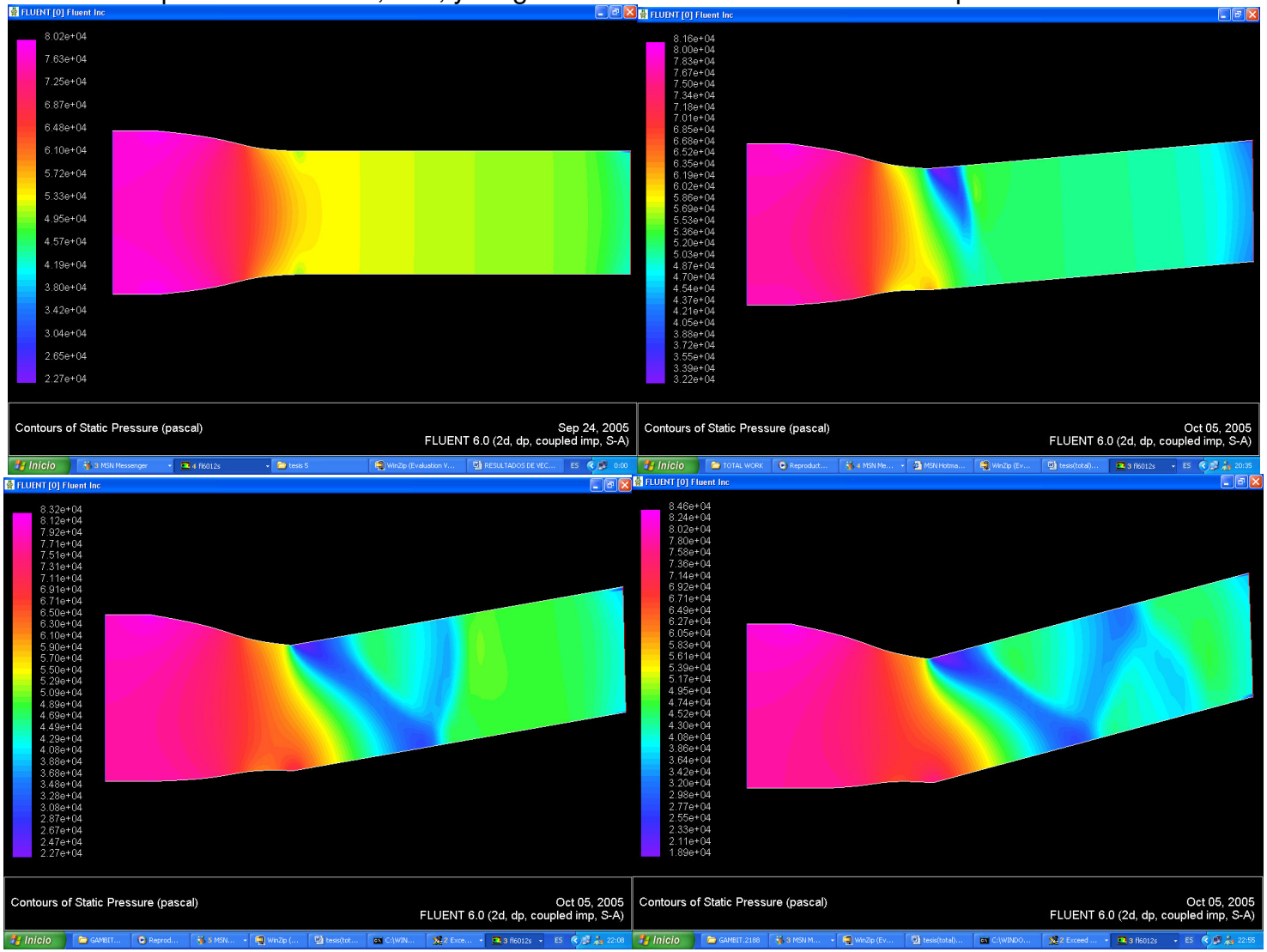
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 49. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 1



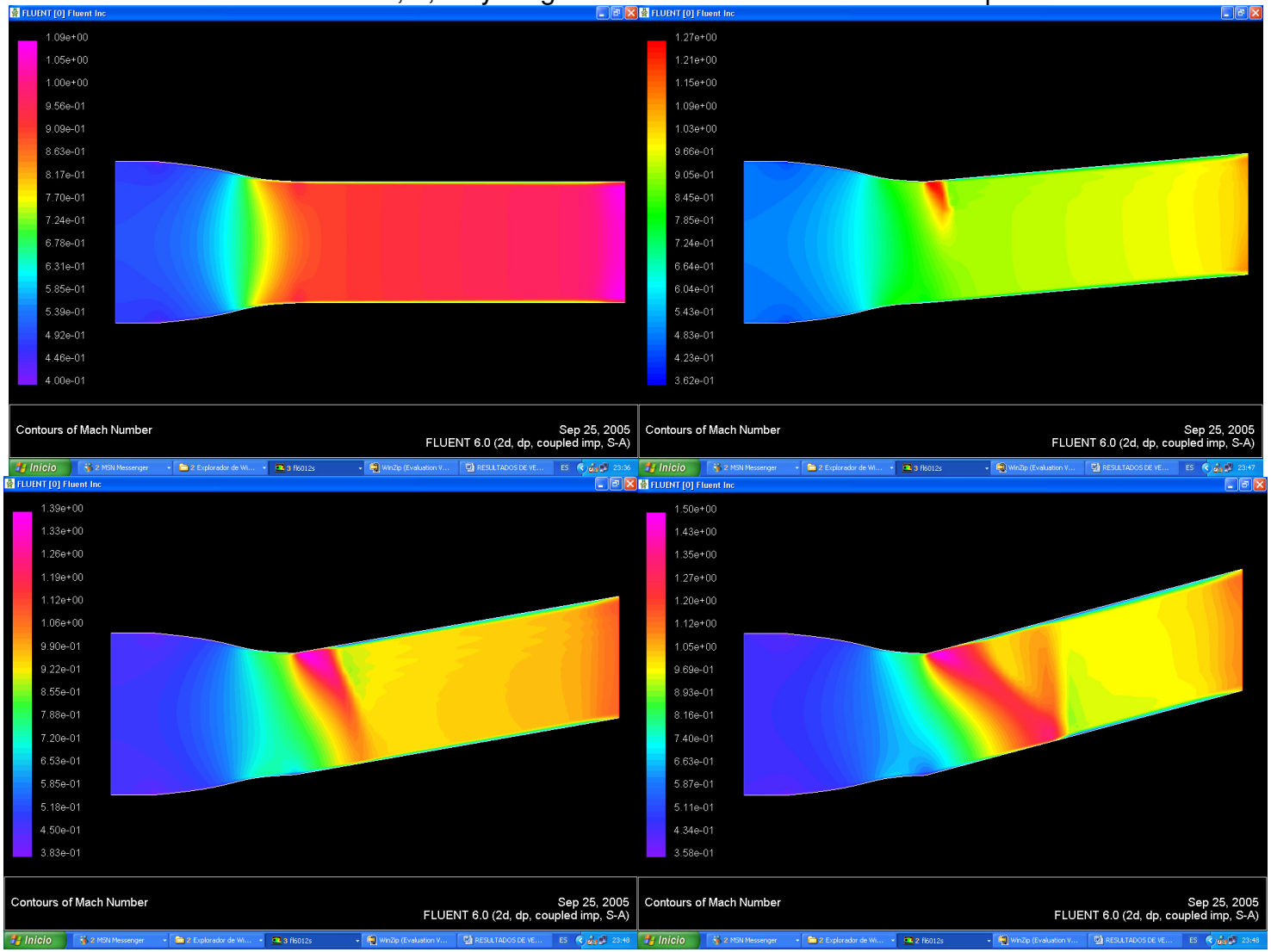
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 50. Perfil de presión estática 0,5 10, y 15 grados de vectorización subsónico tipo 1



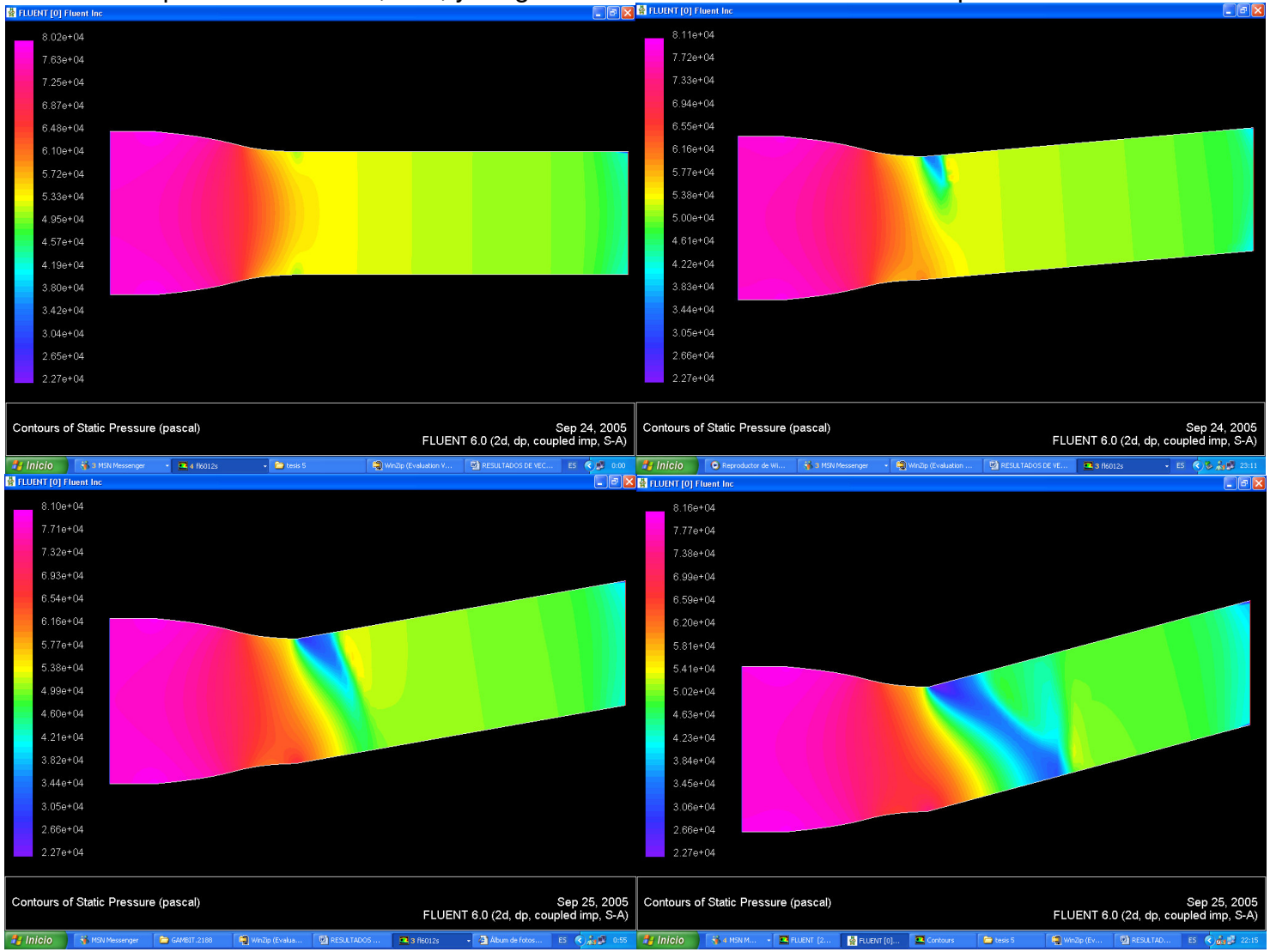
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 51. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 2



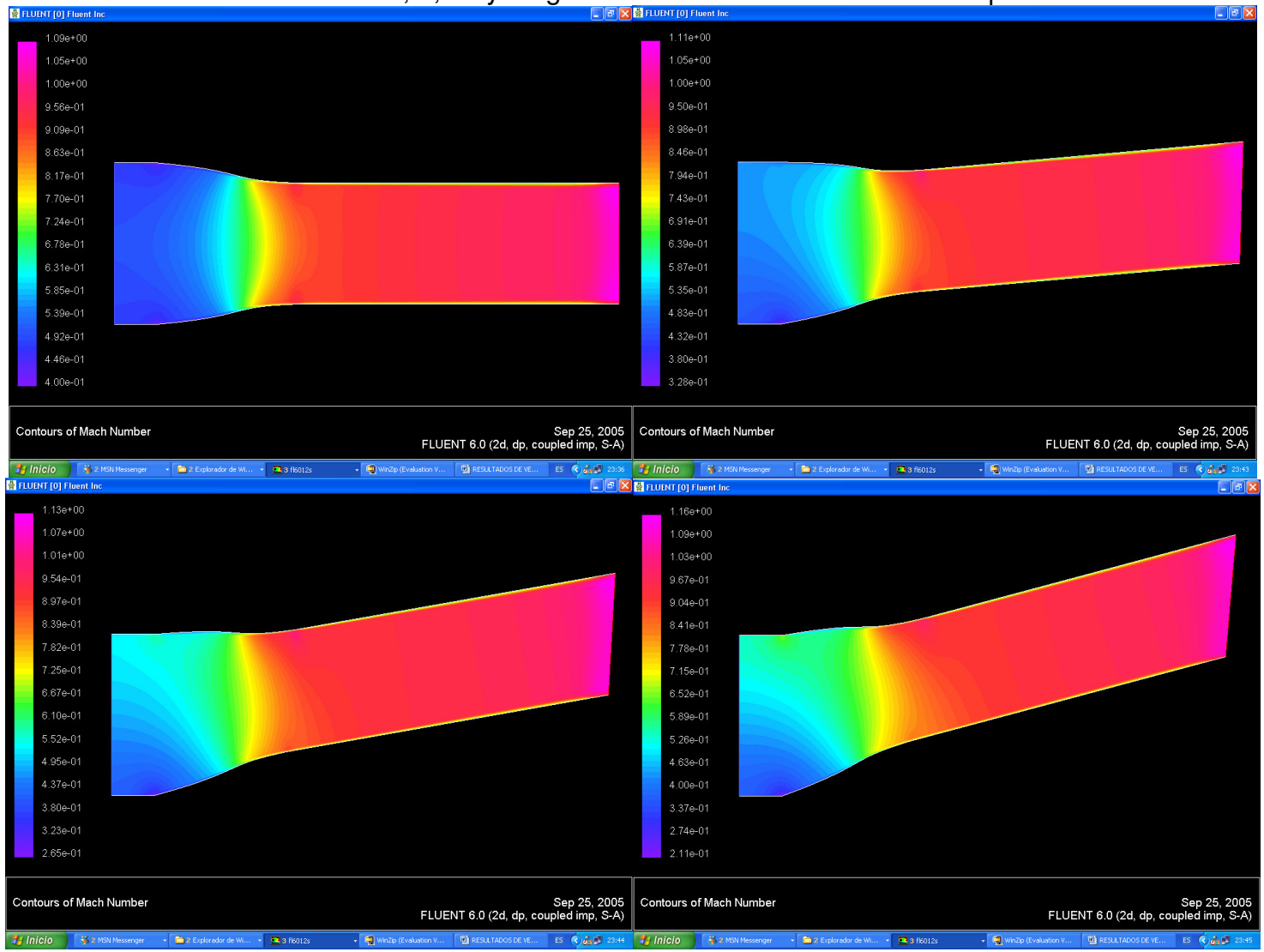
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 52. Perfil de presión estática 0,5 10, y 15 grados de vectorización subsónico tipo 2



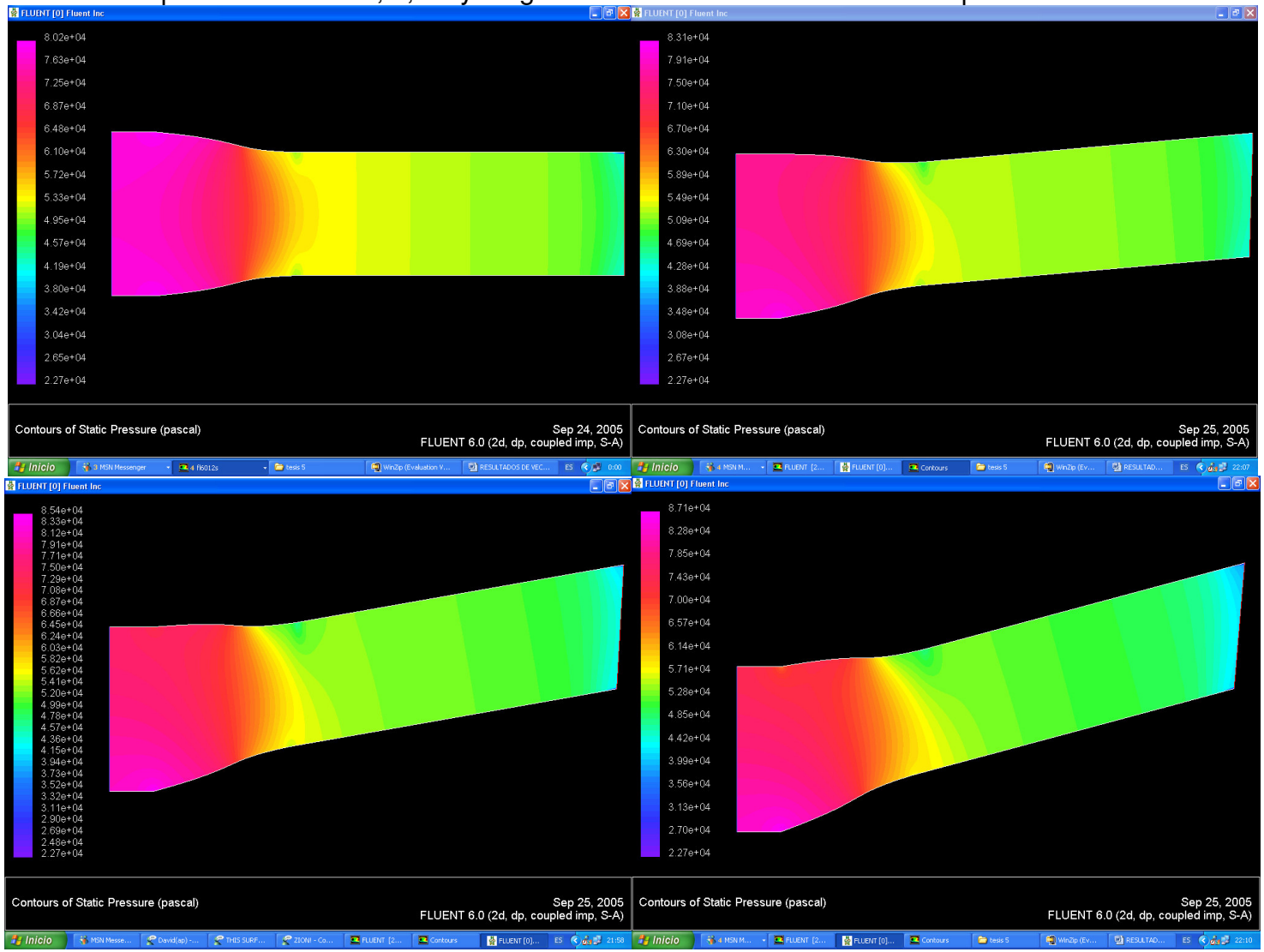
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 53. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 3



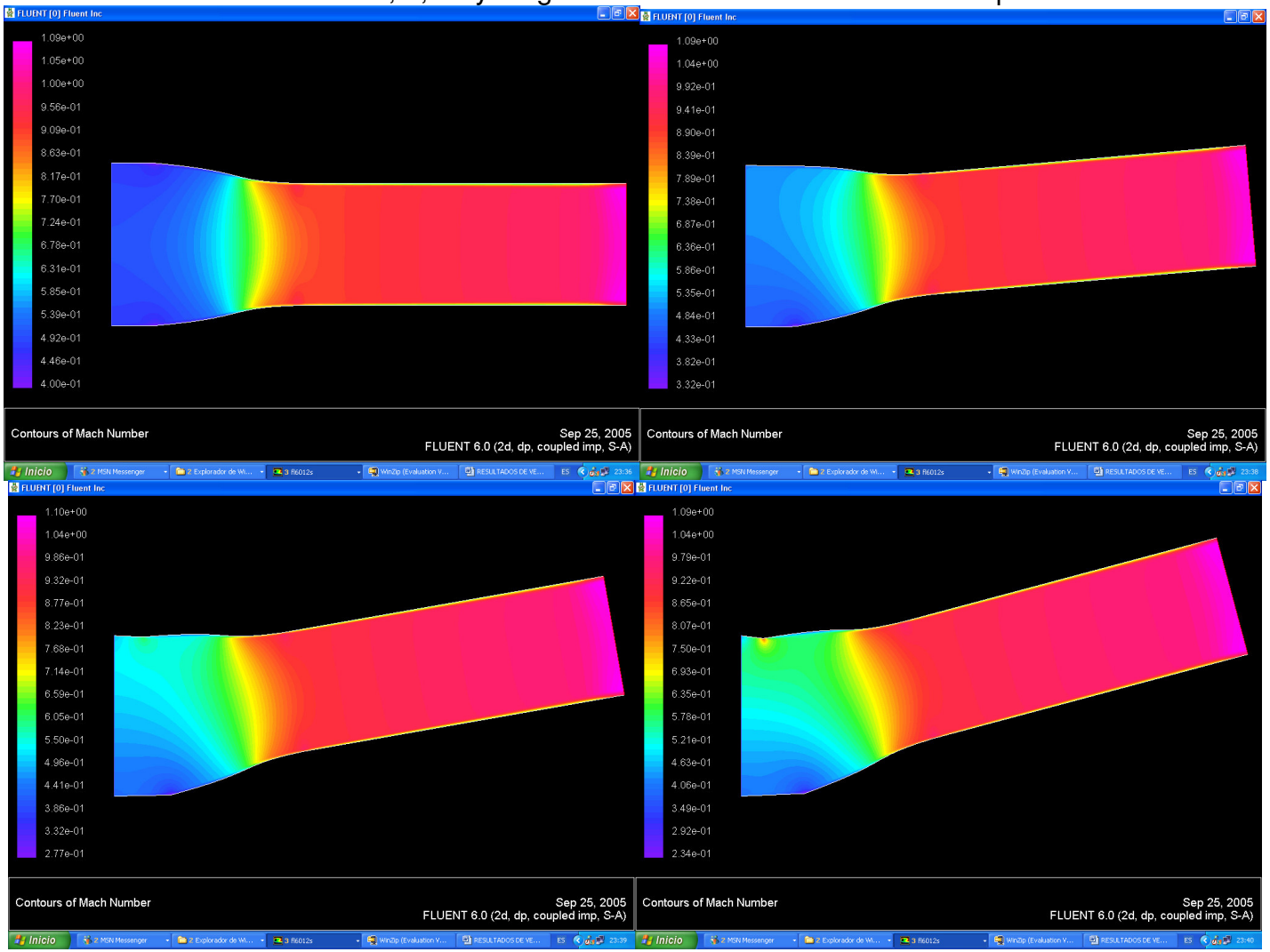
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 54. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 3



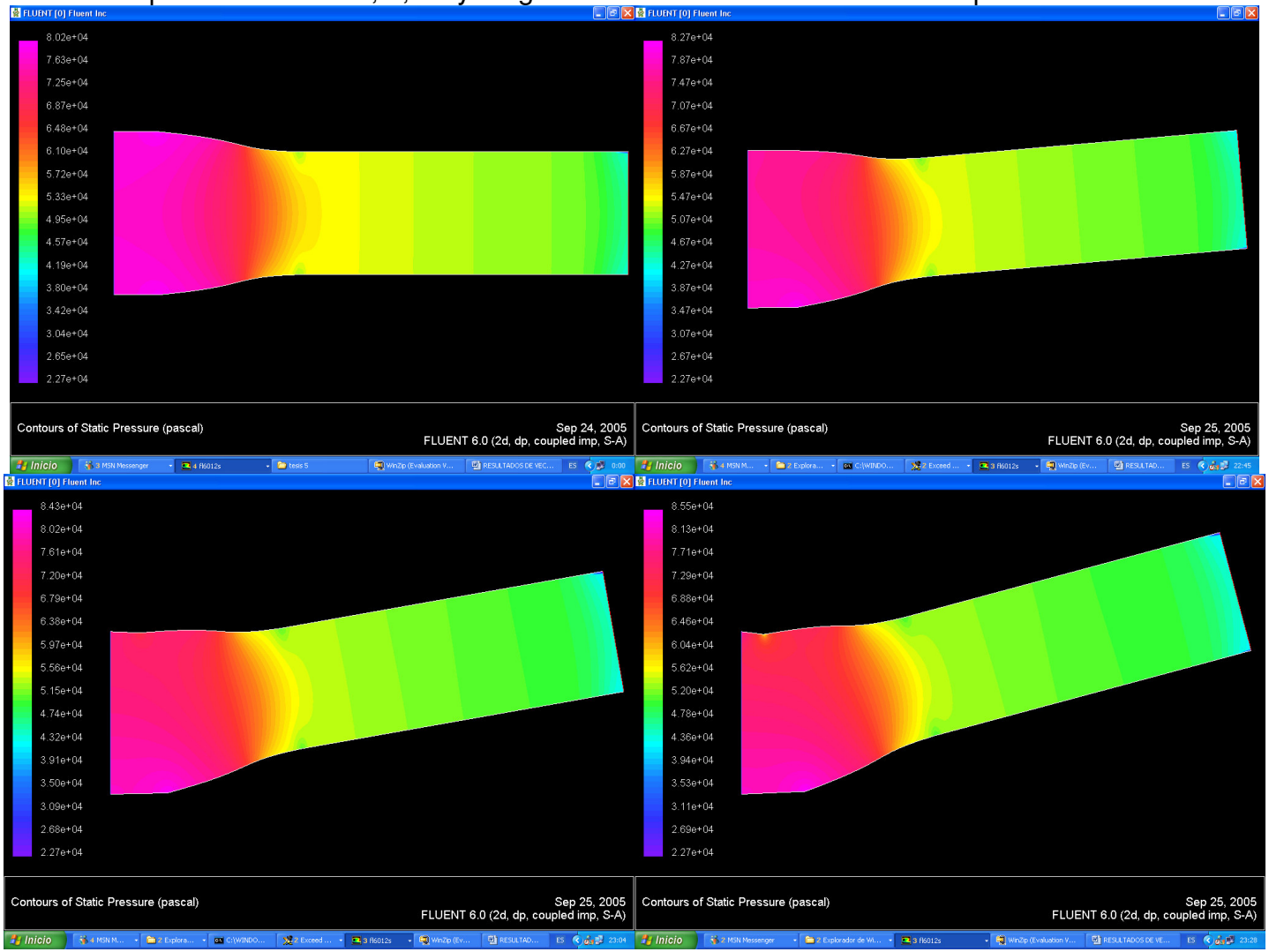
Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 55. Perfil de Número de Mach 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 4



Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 56. Perfil de presión estática 0, 5, 10 y 15 grados de vectorización subsónico tipo 4



Programa Fluent 6,0 2-D

10.3 ANÁLISIS DE LOS CASOS DE VECTORIZACIÓN CRÍTICOS

A continuación se analizarán los casos "críticos" de vectorización (criterio de evaluación según el diseño) para los regimenes supersónico y subsónico, es decir, se tomarán los resultados de cada caso de vectorización para 15 grados y se estudiarán los valores resultantes internos de distribución de presión estática y velocidad en términos de Número de Mach para cada estación transversalmente de la tobera a lo largo de la misma. Estos valores serán comparados teniendo en cuenta las gráficas del capítulo anterior y las gráficas XY obtenidas que se mostrarán para los distintos casos críticos.

Partiendo de esto, se buscarán en una primera aproximación los tipos de vectorización que resulten más efectivos, teniendo en cuenta principalmente la variación de los parámetros transversales internamente a lo largo de la tobera.

Después de analizar y revisar cuidadosamente las figuras resultantes, se seleccionarán las gráficas que tengan mejor rendimiento, es decir, aquellas donde la variación de las características de operación del flujo no cambia en gran proporción, con respecto a los parámetros de la tobera en la que no se ha vectorizado aún el flujo.

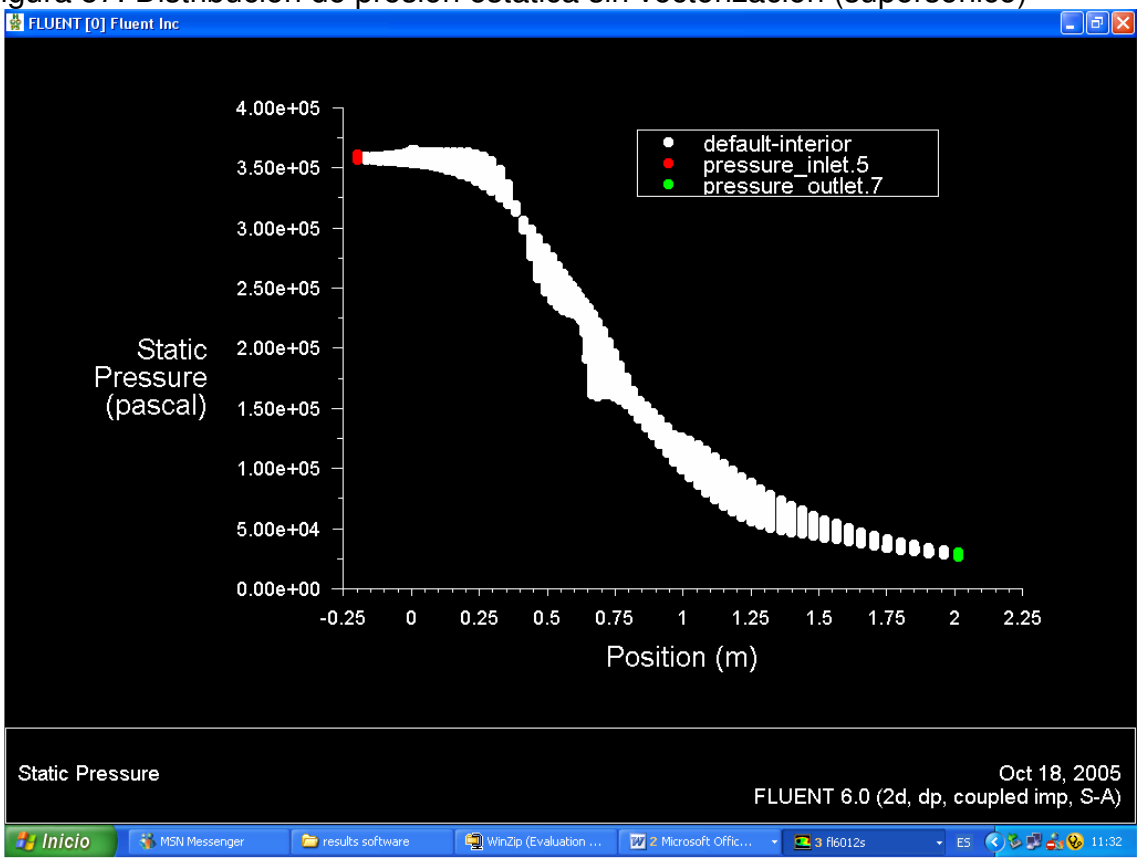
Las gráficas de distribución de los parámetros están en función del comportamiento del flujo interno y de la presión tanto de entrada como de salida del flujo de gas en la tobera transversalmente. En las gráficas, el flujo interno es representado por puntos blancos, el flujo de entrada se representa con puntos rojos y el flujo de salida se muestra con puntos verdes.

10.3.1 Resultados y análisis en régimen supersónico. Teniendo en cuenta la información de análisis previamente postulada para el análisis en régimen supersónico se tienen los siguientes resultados comparativos.

10.3.1.1 Presión estática en régimen supersónico. Para este caso se representa en las figuras 57, 58 y 59 los valores de distribución presión estática que fueron mostrados gráficamente en los esquemas para cada grado de vectorización, sin embargo, como se mencionó anteriormente únicamente las posiciones críticas de vectorización (15 grados) son analizadas.

En la figura 57 se puede observar el perfil de distribución normal de presión estática para una tobera sin ángulo de vectorización, en la que los parámetros internos disminuyen proporcionalmente a lo largo de la tobera hasta que el flujo de gas se expandido completamente y haya alcanzado la presión estática a la salida de magnitud igual a la de la presión estática del ambiente. Se puede observar claramente como desde una presión de entrada definida los valores estáticos cambian para acelerar los gases dentro de la tobera y de esta manera aumentar los parámetros dinámicos (velocidad) dentro de la misma para obtener una gran magnitud a la salida.

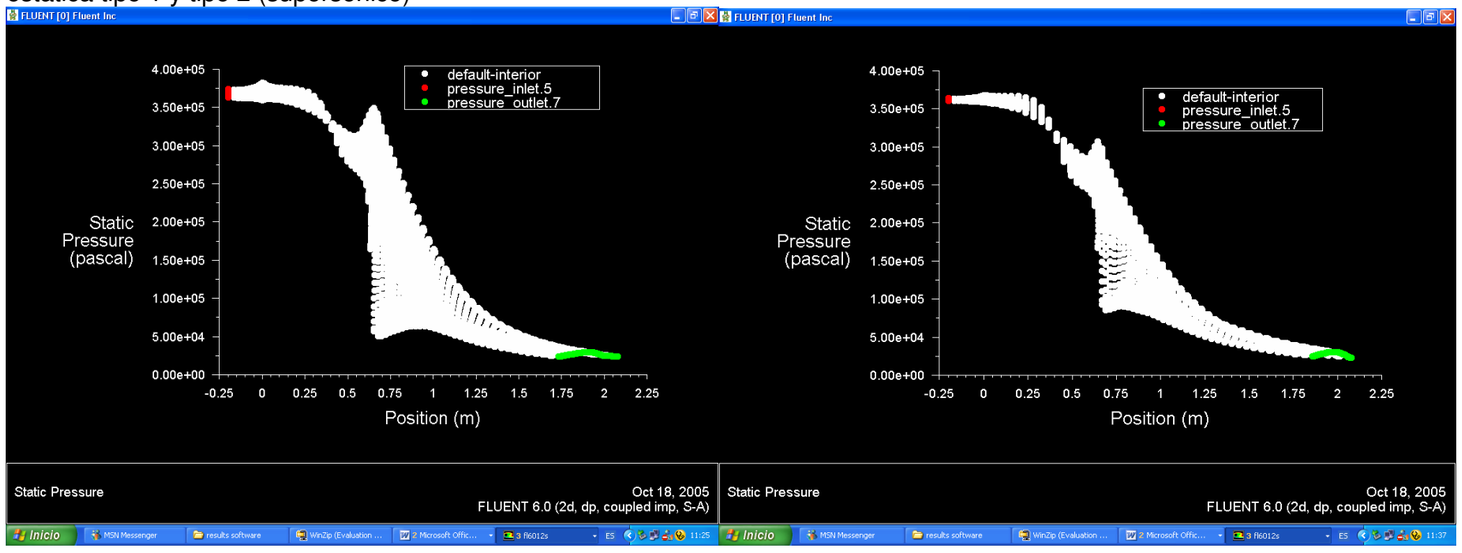
Figura 57. Distribución de presión estática sin vectorización (supersónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

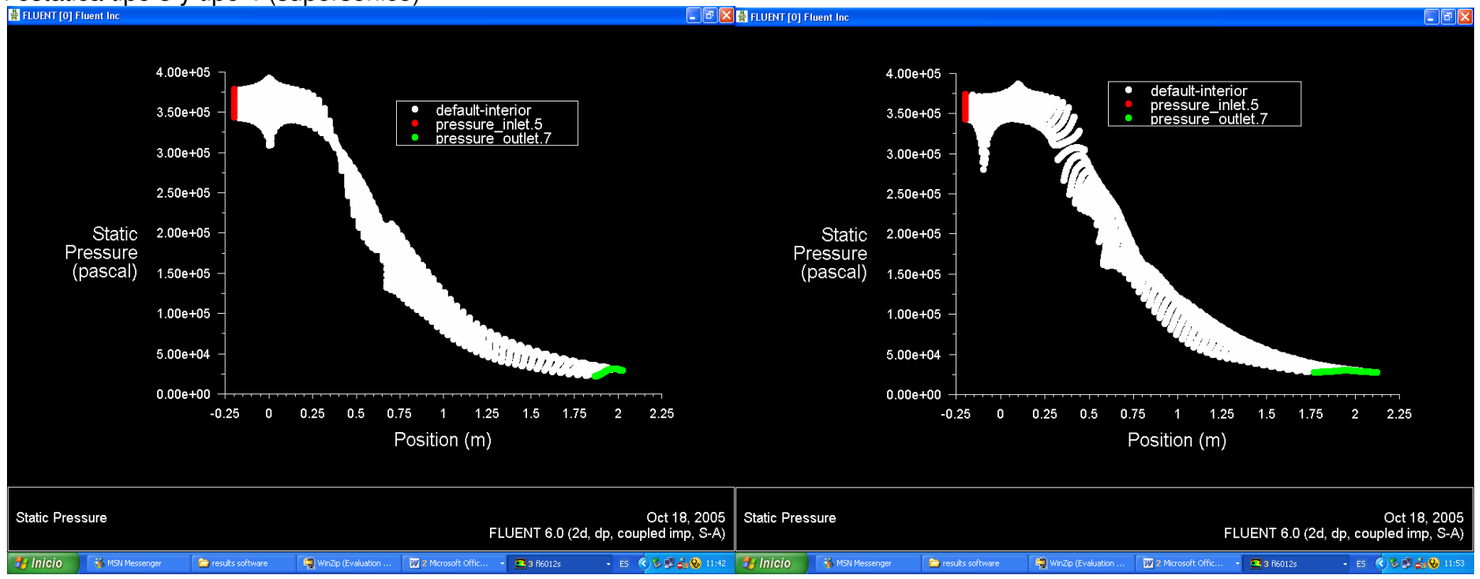
Idealmente se busca que la línea representativa (línea formada por todos los puntos transversales) sea lo más simple y uniforme posible, esto garantizará tener un flujo de gas constante sin mayores variaciones. Lo anterior puede ser cumplido mediante el perfilamiento adecuado de la tobera y una correcta operación de todos los parámetros de funcionamiento. Para el caso propuesto, la línea de distribución de presión supersónica muestra un comportamiento estándar sin cambios o alteraciones significativas.

Figura 58. Distribución de presión estática tipo 1 y tipo 2 (supersónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 59. Distribución de presión estática tipo 3 y tipo 4 (supersónico)

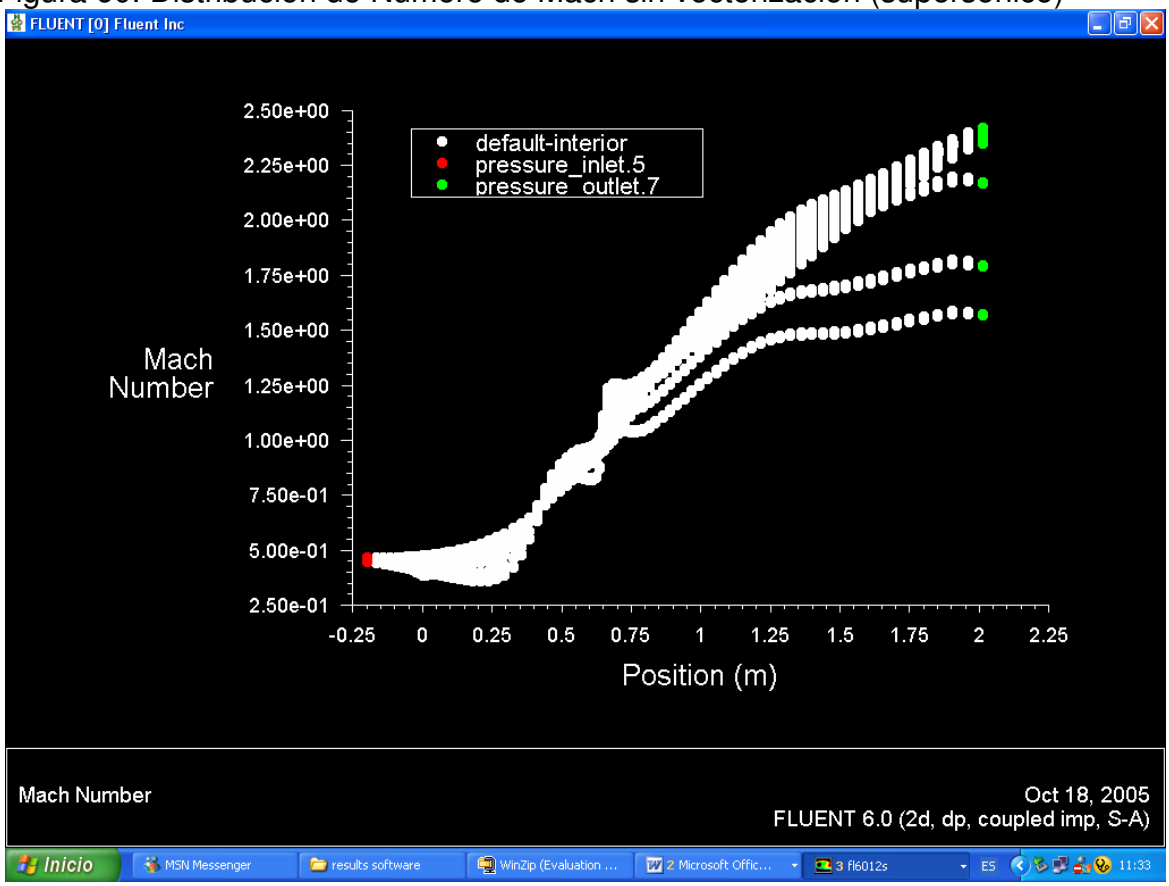


Programa Fluent 6,0 2-D

Para los casos de vectorización se puede observar que las variaciones más grandes de presión estática con respecto al caso de cero grados de vectorización (figura 57) se tienen en los tipos 1 y 2 (figura 58). Por el otro lado, los gráficos de distribución de presión estática de los tipos 3 y 4 (figura 59), son los que se ajustan de una mejor manera a la distribución ideal.

Al revisar los puntos de presión estática de salida (puntos verdes) se puede observar uniformidad en todos los casos con unas muy pequeñas variaciones que se encuentran en el caso tipo 3, esto en parte es debido al mecanismo de vectorización que es utilizado, ya que este, influenciará directamente en el comportamiento del flujo. Además de esto, es posible observar que la distribución de presión estática permanece más constante para el caso tipo 4, teniendo en cuenta la enorme variación geométrica longitudinal por efecto del proceso de vectorización.

Figura 60. Distribución de Número de Mach sin vectorización (supersónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

El método de vectorización más efectivo en función de la distribución de presión estática es el número 3, ya que sus parámetros no varían mucho con respecto a los parámetros del componente sin vectorizar. Este modelo resulta más eficiente ya que se tendrán menos variaciones que puedan alterar el comportamiento funcional de la tobera, únicamente si se tiene en cuenta este parámetro para ser seleccionado. En las siguientes se analizarán los parámetros restantes.

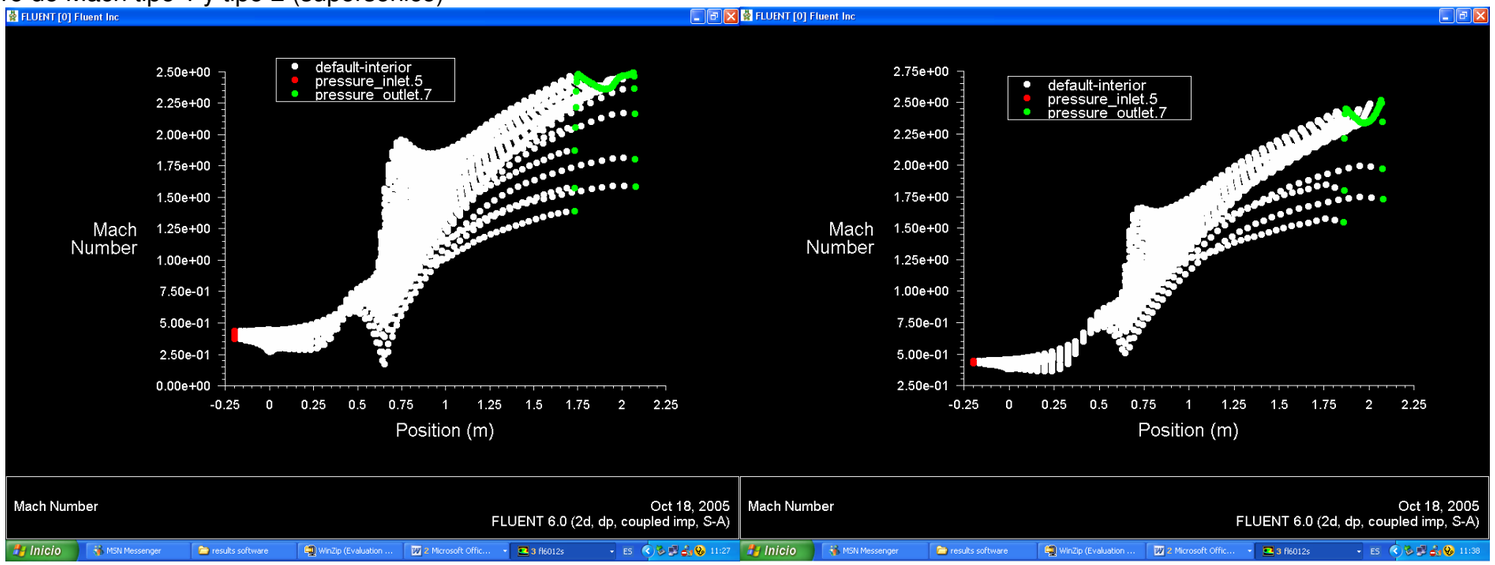
10.3.1.2 Número de Mach en régimen supersónico. En la figura 60 se puede observar por medio del cambio en la magnitud del Número de Mach, la variación de los parámetros dinámicos del flujo. Se puede notar claramente como el flujo desde una velocidad en la entrada (M = 0.4), se expande hasta alcanzar una velocidad de salida de (M = 2.5) generando la velocidad en condiciones de diseño adecuada para producir el empuje requerido. Dentro de la tobera se pueden observar variaciones internas del flujo las cuales se manifiestan principalmente a la salida, esto es debido primeramente al perfilamiento de la tobera y al efecto de la viscosidad del flujo en los contornos de la misma.

Teniendo en cuenta, los casos de vectorización tipo 1 y tipo 2 mostrados en la figura 61 se pueden observar las grandes variaciones de velocidad con respecto al Número de Mach; el tipo 1 tiene las mayores diferencias lo cual recalca que su utilización no es muy aconsejable, ya que es el que más está generando cambios en el comportamiento del flujo. Las líneas de tendencia de ambos métodos de vectorización tienen enormes variaciones del comportamiento interno del flujo transversalmente localizadas en la sección de la garganta, estas variaciones se observan claramente desde la posición de la garganta hasta la salida y tienen un rango de cambio desde M = 0.25 hasta M = 2 para ambos casos.

Los casos tipo 3 y tipo 4 (figura 62) son los más efectivos, como se observa en la gráfica, el perfil de distribución de velocidad en términos del número de Mach es el que mejor se acerca al perfil de distribución de operación normal (régimen sin vectorización ver figura 60). Las variaciones significativas de estos dos casos principalmente se encuentran en la sección de unión del post – quemador con la tobera (en los esquemas se identifica en la coordenada X = 0m.) y a partir de la sección longitudinal de la garganta donde varía proporcionalmente los resultados.

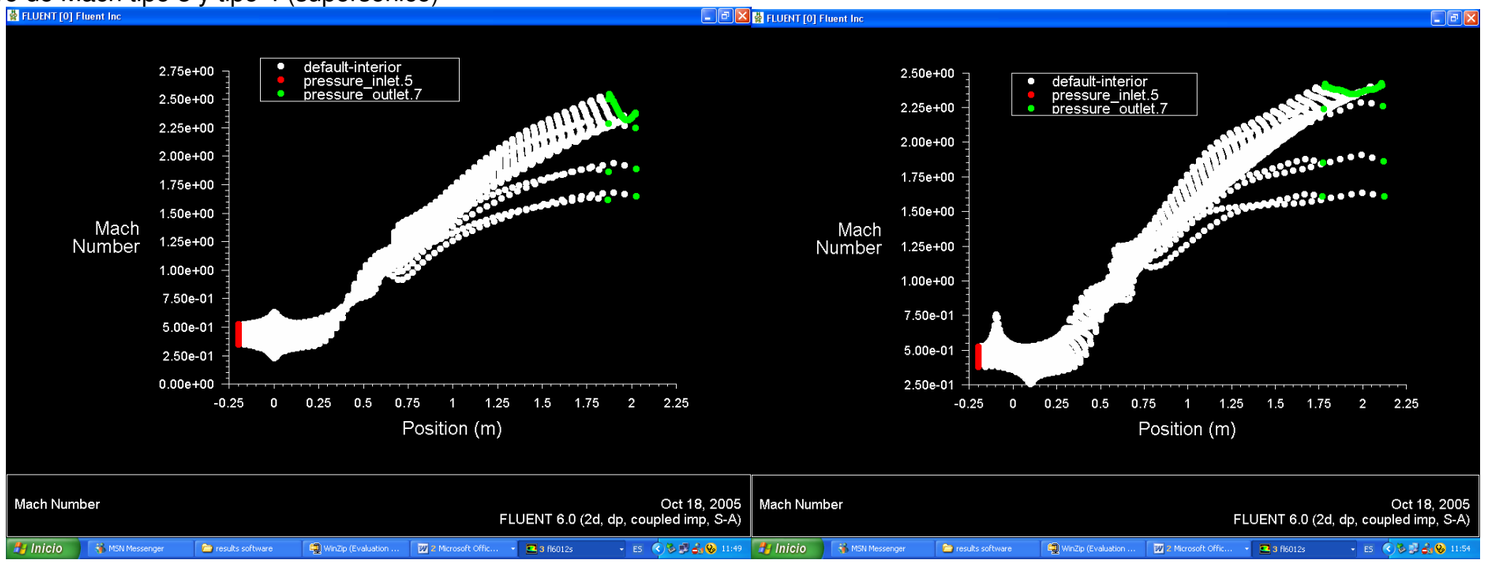
Otro dato característico a evaluar, se puede observar en los puntos locales resultantes de salida del flujo (puntos verdes), en estos se muestra el grado de variación del número de Mach en la estación respectiva.

Figura 61. Distribución de Número de Mach tipo 1 y tipo 2 (supersónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 62. Distribución de Número de Mach tipo 3 y tipo 4 (supersónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

Para cada caso crítico, la variación en la salida es mínima. En estos esquemas se pueden observar pocos puntos donde los valores de número de Mach son más bajos, esto es causado principalmente por el efecto de la fricción del flujo con los respectivos contornos de la tobera y el perfilamiento de la misma.

Al analizar las variaciones a la salida de la tobera vectorizada de los casos más efectivos (casos tipo 3 y tipo 4), se puede encontrar una variación importante en la componente de velocidad del flujo en el caso tipo 3, influenciado directamente por el método de vectorización. Por el otro lado, el caso crítico tipo 4 tiene un perfil de distribución de número de Mach más constante, lo cual permite tener una mejor uniformidad en la salida del flujo de la tobera, para obtener un mejor rendimiento de vectorización.

10.3.2 Resultados y análisis en régimen subsónico. Ahora se procederá a estudiar los resultados del análisis de la tobera en régimen subsónico. En esta sección es necesario recordar que la tobera no produce la expansión completa del gas, lo cual es causado por los parámetros de entrada con los cuales está trabajando, sin embargo, como se observó en las figuras 49 a la 56, las variaciones del ángulo de vectorización influirán notablemente en el comportamiento de flujo según el tipo de método de vectorización que sea utilizado.

Este análisis de cierta manera es aún más complicado, ya que para este procedimiento, la influencia de la viscosidad y los demás parámetros del flujo en el tubo recto, cambian notablemente los resultados y se obtiene aproximaciones de cierta forma razonables que permiten predecir que pasa con el flujo.

Revisando los casos críticos de vectorización en el análisis subsónico se observó la presencia de ondas de choque en la parte donde se encuentra el tubo recto y varían dependiendo del ángulo de vectorización, esto se puede ver en las figuras 49, 50, 51 y 52 para los casos tipo 1 y tipo 2, estos resultados muestran que la utilización de estos tipos de vectorización no son adecuados para ser empleados, ya que fácilmente se observan las bruscas variaciones que tiene el flujo cuando el mismo es vectorizado.

Además de lo anterior, revisando los datos obtenidos para el análisis supersónico los resultados para los casos tipo 1 y tipo 2 no fueron los más adecuados para selección, ya que también producían variaciones del flujo disminuyendo en alto porcentaje su rendimiento durante la operación.

Por el otro lado, los casos tipo 3 y tipo 4 fueron los más efectivos, teniendo variaciones no muy grandes de los parámetros internos. En especial, cabe mencionar que el caso 3 ha dado los mejores resultados mostrando cambios no muy significativos a lo largo de la tobera.

Teniendo en cuenta esto, ahora se estudiarán los mismos resultados de los métodos de vectorización para el caso subsónico para que se realice un análisis acertado de la influencia de la vectorización en el comportamiento del flujo y se pueda escoger y recomendar el sistema más adecuado para un estudio más específico.

De la misma manera que para el análisis de caso supersónico, las gráficas de distribución de los parámetros están en función del comportamiento del flujo interno para cada estación transversalmente y de la presión tanto de entrada como de salida del flujo de gas en la tobera. El flujo interno es representado por puntos blancos, la presión estática de entrada se representa con puntos rojos y la presión de salida se muestra con puntos verdes

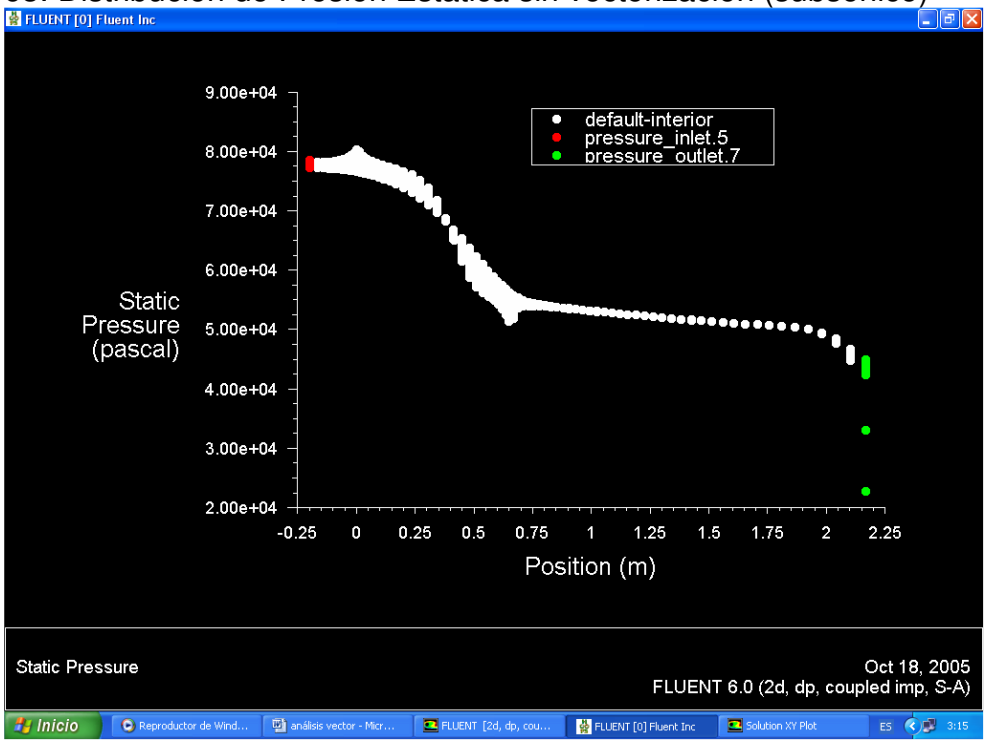
10.3.2.1 Presión estática en régimen subsónico. La figura 63 muestra la distribución estática normal para régimen supersónico de la tobera sin ángulo de vectorización. Para el caso subsónico, es necesario que el gas se expanda hasta alcanzar la presión estática del ambiente, sin embargo, como se observó anteriormente, en este caso la tobera diseñada opera en los límites de utilización de toberas convergentes. Además de esto, se puede observar la presión resultante generada en el tubo (parte divergente en régimen subsónico) la cual disminuye en un menor porcentaje la magnitud de presión estática resultante a la salida.

Para el caso propuesto se puede notar con facilidad como los parámetros estáticos internos varían cambiando desde la entrada hasta expandir el gas en su máxima proporción en la garganta (salida), aumentando los valores de presión dinámica proporcionalmente, para garantizar que la presión total se mantenga constante. En la figura 63 se pueden observar ciertas variaciones locales que son generadas principalmente por efecto del perfilamiento de la tobera y el efecto de la viscosidad con el tubo recto, sin embargo, la línea de tendencia del flujo transversalmente tiene el comportamiento adecuado para operar bajo este régimen.

Acorde a la información anterior, fácilmente se puede observar que al igual que en régimen supersónico, los casos tipo 1 y tipo 2 (figura 64) tienen enormes

desventajas para el trabajo adecuado en operación subsónica, ya que como se mencionó antes, se generan ondas de choque internas en la tobera que para este caso de análisis en particular no son adecuadas, ya que una gran cantidad de energía se estaría perdiendo por efecto de la vectorización y operación de la tobera como tal.

Figura 63. Distribución de Presión Estática sin vectorización (subsónico)

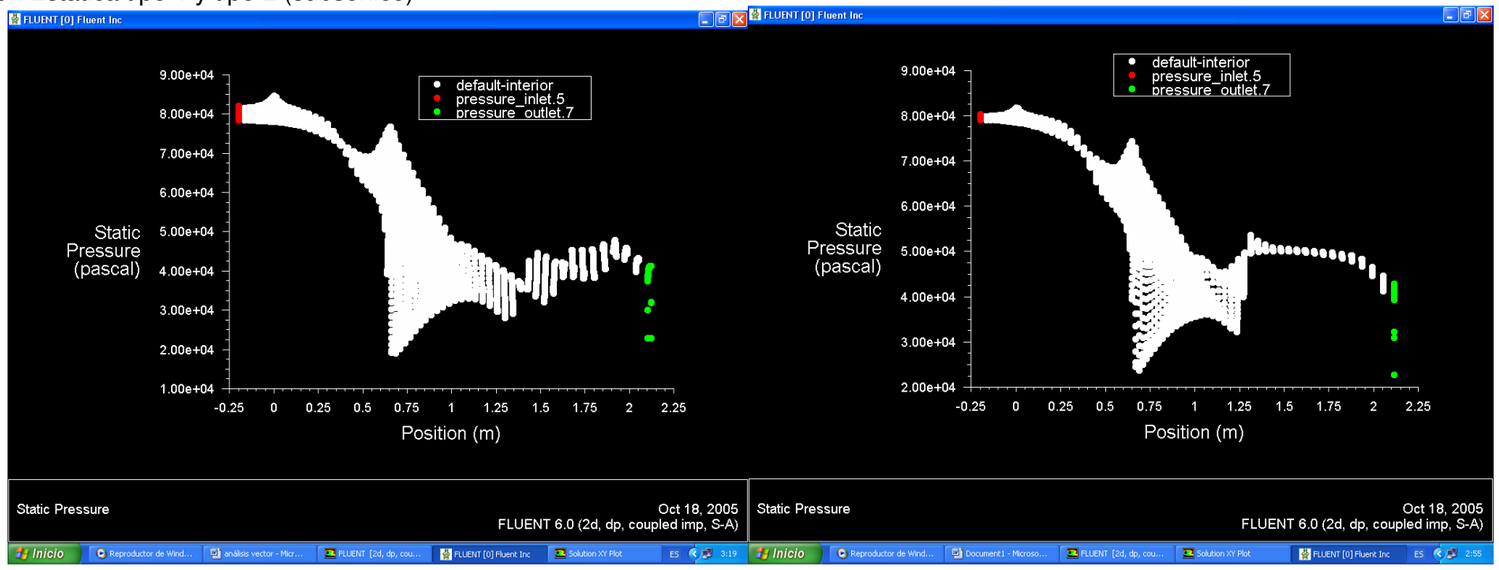


Programa Fluent 6,0 2-D

Por otro lado, los casos tipo 3 y tipo 4 (figura 65) muestran un comportamiento más constante y similar al caso de cero grados de vectorización (mostrado en la figura 63); este perfil asegura que haya una mejor disposición del flujo internamente con la mínima variación posible en sus características internas.

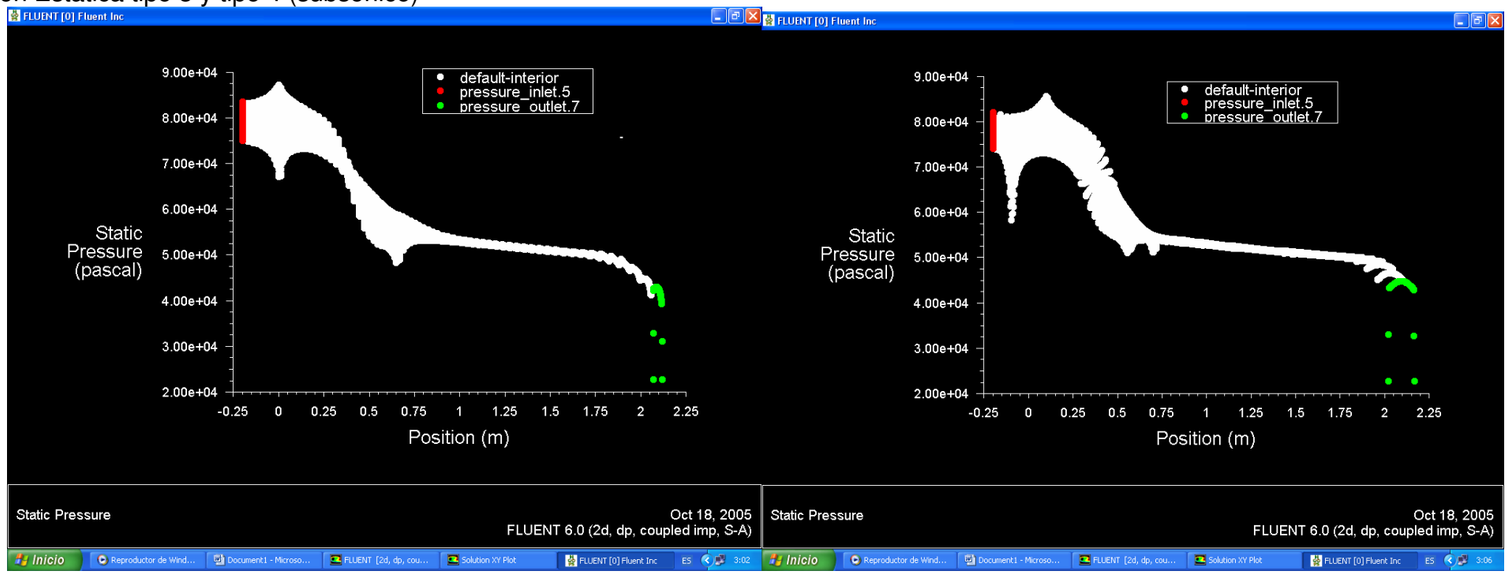
Además de lo anterior, se puede observar que la diferencia más notable entre estos 2 tipos de vectorización se encuentra principalmente en la parte convergente (aproximadamente entre los 0 y los 0.5 m longitudinales de la tobera), en donde los cambios más altos se observan para el caso crítico de vectorización número 4, así mismo, es posible observar una enorme caída en la presión estática en este mismo caso, exactamente en la posición en donde se encontraría la unión con el post – quemador (aproximadamente en -0.1m longitudinales de la tobera, figura 65 caso tipo 4).

Figura 64. Distribución de Presión Estática tipo 1 y tipo 2 (subsónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 65. Distribución de Presión Estática tipo 3 y tipo 4 (subsónico)

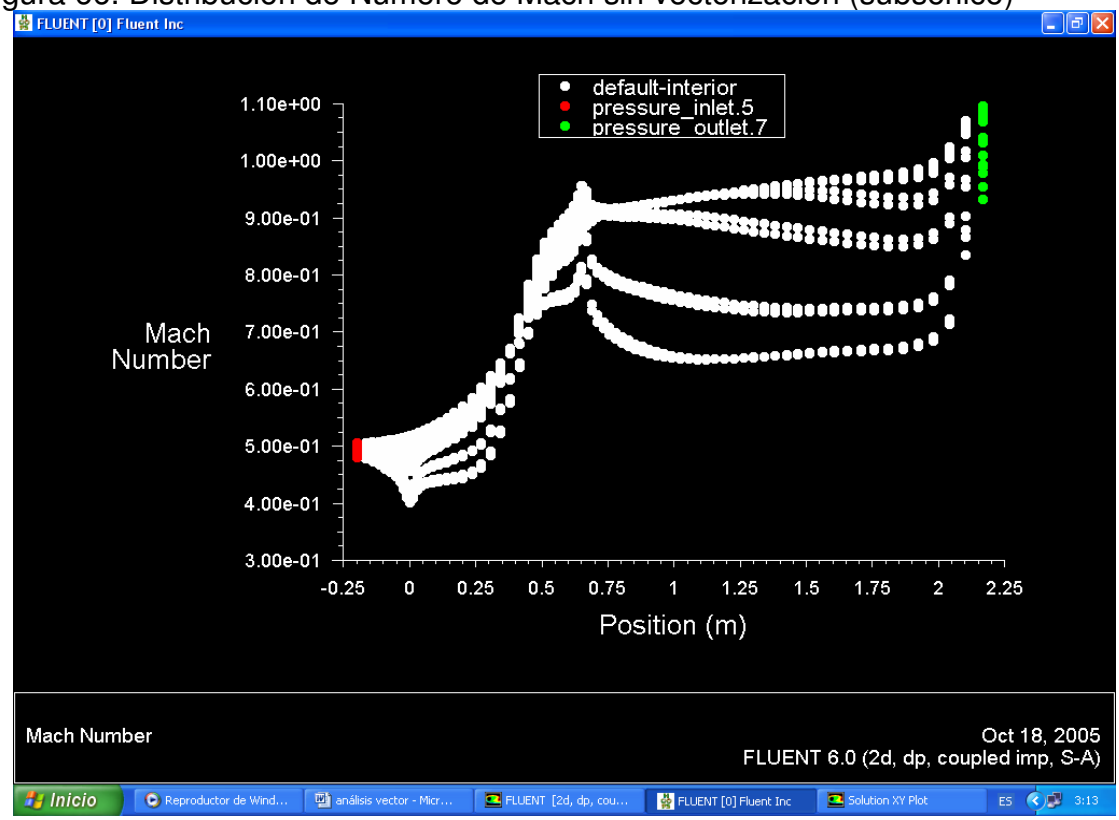


Programa Fluent 6,0 2-D

Con respecto a la distribución de la presión estática de salida se puede observar con facilidad que se tiene un comportamiento similar de todos los casos de vectorización. Sin embargo, analizando los resultados es posible determinar también que el caso número 4 es el más óptimo, ya que su distribución es la más simétrica de todas, lo cual aumentaría la eficiencia del componente de actuación si se llegara a utilizar.

10.3.2.2 Número de Mach en régimen subsónico. Para esta parte, se pueden observar cambios bastante notables en el perfil que el flujo tiene con respecto a la variación del Número de Mach, esto se observa en las figuras 66, 67 y 68, y en las gráficas del capítulo anterior (figuras 49, 51, 53 y 55).

Figura 66. Distribución de Número de Mach sin vectorización (subsónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

En la figura 66 se puede observar el perfil de distribución de Número de Mach internamente en la tobera subsónica, para este caso se muestran claramente variaciones abruptas en la sección del tubo recto, las cuales son generadas inicialmente por la interacción del flujo con dicha superficie, lo que produce variaciones importantes en las predicciones de velocidad a lo largo de esta

sección. Estas variaciones manejan velocidades de aproximadamente M = 0.65 - 0.85 en la sección del tubo recto y se encuentran para la salida en un rango aproximado de M = 0.95 – 1.08.

Como en el caso anterior, ahora se pueden resaltar los enormes cambios de velocidad que se obtienen vectorizando el flujo. Esto se demuestra en el caso 1 (figura 67) donde se llega a alcanzar valores de Mach 1,6 lo cual resulta inaceptable para ser estudiado posteriormente, ya que en este régimen de trabajo es necesario utilizar una tobera de laval que cumpla con los requerimientos de operación necesitados para obtener del componente la máxima efectividad.

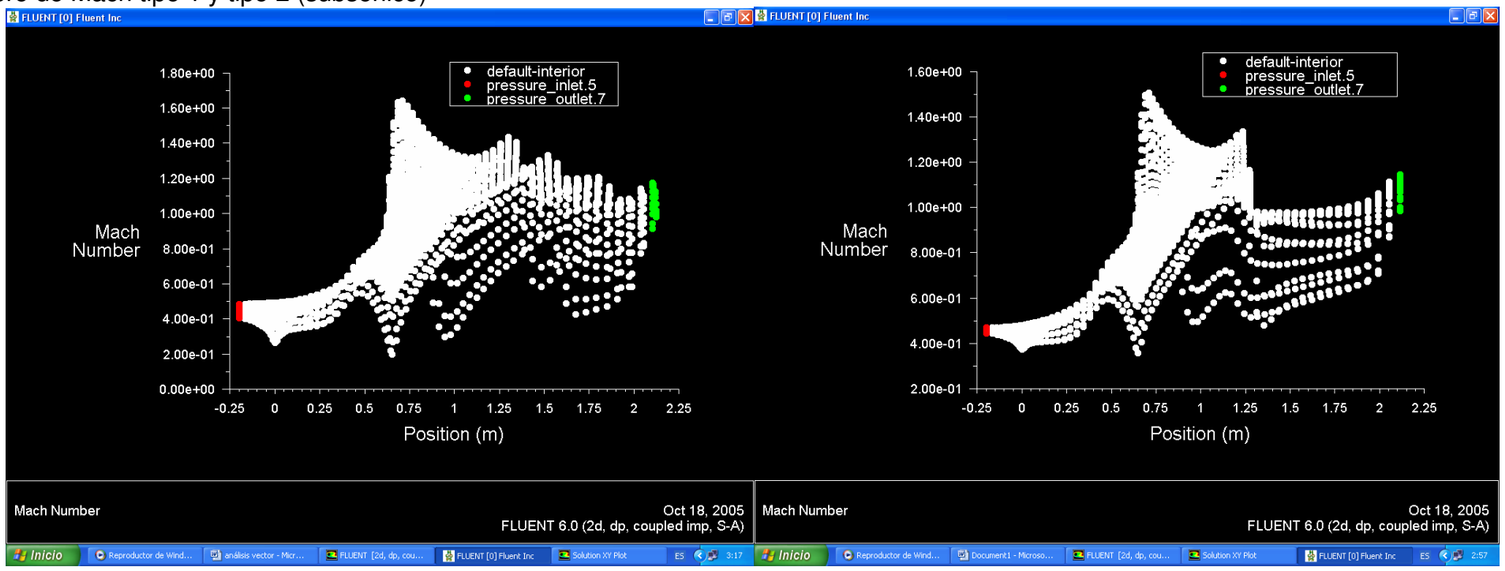
Igualmente, el caso número 2 (figura 67) alcanza valores de Mach 1.4 lo cual indica que el método de vectorización utilizado tampoco es el más adecuado para ser trabajado.

Adicional a lo anterior, las gráficas muestran enormes variaciones de los parámetros de velocidad en las secciones inmediatas a la garganta de la tobera, esto se puede identificar en la figura 67 comparando esta información con la obtenida en la figura 66 (caso sin vectorización).

Para los casos críticos tipo 3 y tipo 4 (figura 68), los cuales muestran el mejor parecido de perfil de distribución de velocidad en términos del número de Mach, es importante notar que se encuentran líneas independientes de valores de velocidad, esto se produce en la sección compuesta por el tubo recto, y es causado principalmente por el cambio en las características del fluido a flujo transónico. El estudio del flujo transónico no está muy bien definido, ya que los parámetros para el fluido varían aleatoriamente sin un patrón claro con el cual pueda ser predicho su respectivo comportamiento, sin embargo, el programa de análisis utilizado proporciona un perfil razonable para el análisis de esta clase de flujo, acorde a los parámetros de operación con los que se han desarrollado los respectivos análisis.

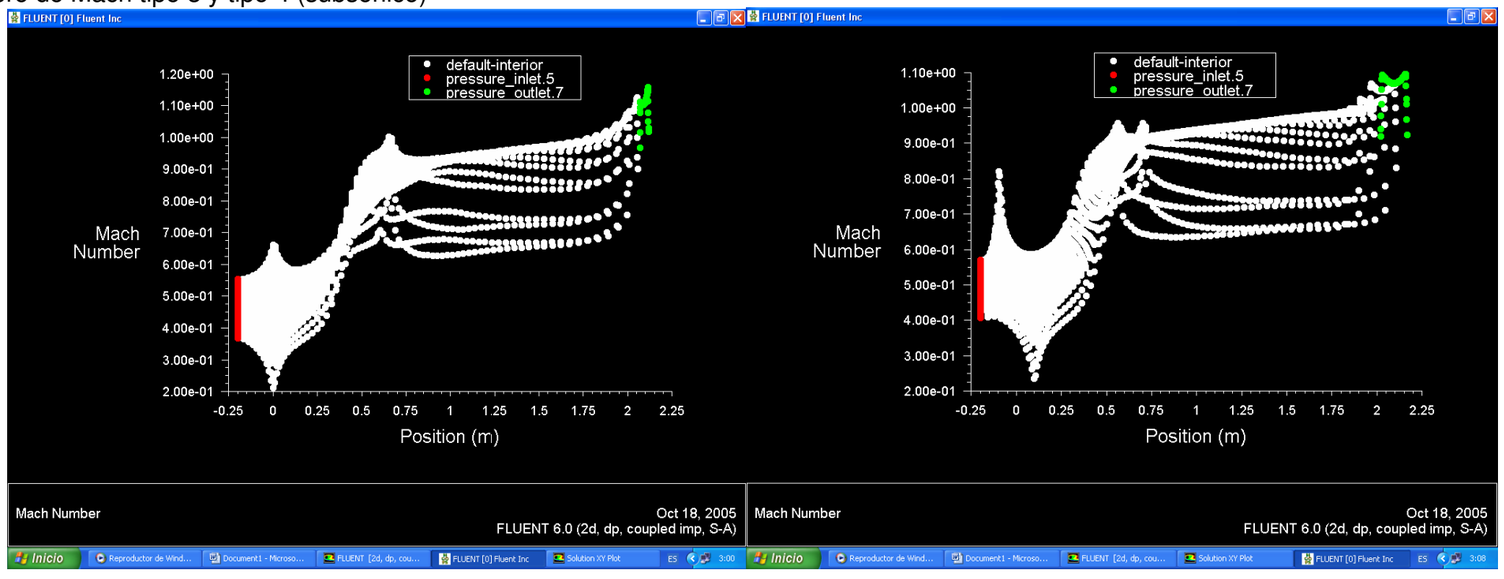
En los casos tipo 3 y tipo 4 se puede observar que el flujo maneja un número de Mach aproximadamente igual a uno, a la salida de la tobera, con un perfil más constante y simétrico para el caso crítico número 4. Sin embargo, también se pueden notar variaciones importantes en las secciones ubicadas inmediatamente cerca de la entrada del flujo, donde para el flujo del caso tipo 4 se obtiene una variación de hasta Mach 0.8, lo cual de cierta forma estaría alterando el comportamiento normal de los parámetros dentro de la tobera.

Figura 67. Distribución de Número de Mach tipo 1 y tipo 2 (subsónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

Figura 68. Distribución de Número de Mach tipo 3 y tipo 4 (subsónico)



Programa Fluent 6,0 2-D

El número de Mach a la salida es más constante para el caso crítico número 4, comparándolo con los valores obtenidos en el análisis para el método de vectorización caso tipo 3, ya que este último presenta cierta discontinuidad en la distribución del perfil de velocidad para ese modelo.

11. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA TOBERA

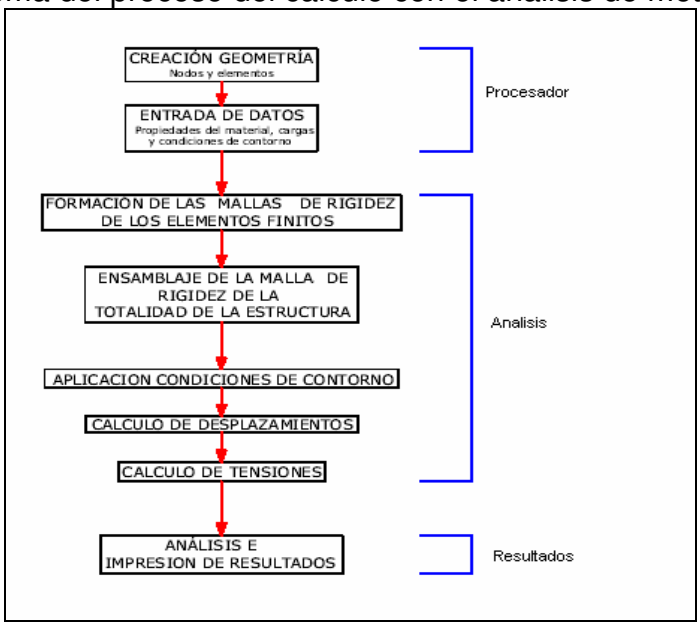
11.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Debido a la complejidad de la estructura se realiza el análisis de esfuerzos tomando como herramienta de solución el programa de elementos finitos AUTOFEA versión 9.0, la cual es un demo gratuito que permite el desarrollo de este tipo de estructuras.

Mediante programas de elemento finitos se simular y calcular muchos tipos de estructuras. Los programas de elementos finitos ofrecen resultados exactos frente a resultados obtenidos mediante cálculos manuales. De esta manera se puede obtener una aproximación válida para determinar el comportamiento estructural de la tobera.

11.1.1. Etapas para el cálculo de la estructura. Se distinguen tres bloques bien diferenciados que componen el proceso de cálculo de estructuras mediante el empleo de elementos finitos. Estos se listan a continuación:

Figura 69. Esquema del proceso del cálculo con el análisis de métodos finitos



Diseño del autor.

A continuación se explica el diagrama de flujo que se utiliza en cualquier análisis de elementos finitos.

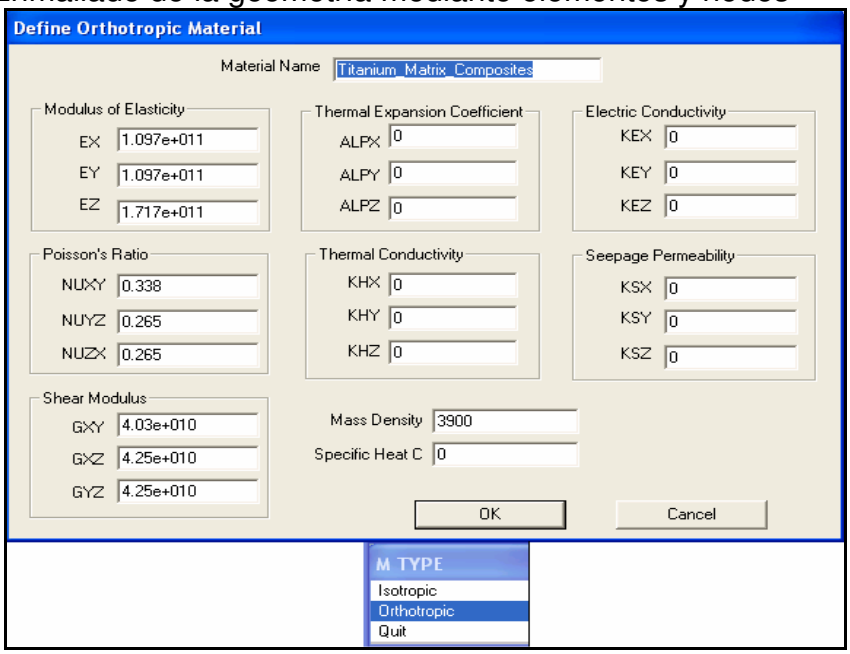
- **Procesador:** El objetivo principal del procesador es conseguir la estructura mallada mediante nodos y elementos. Éstos, son los puntos de control de la estructura mallada a través de los cuales se introducen datos y se obtienen resultados.

- **Análisis:** Parte interna del proceso. Resolución de sistemas de ecuaciones a partir de los datos introducidos, puede ser de forma estática, dinámica y térmica, además nos especifican el tipo de análisis.

- **Resultados:** Análisis de resultados. En el esquema adjunto se resumen las etapas principales en base a la programación con ordenador cuando se emplea el método de cálculo de estructuras mediante elementos finitos.

11.1.2 Especificar material y propiedades de cada elemento. Para efectos de este análisis se realiza un estudio por partes de la tobera en el cual se toma desde la entrada (5) hasta la garganta o sección convergente.

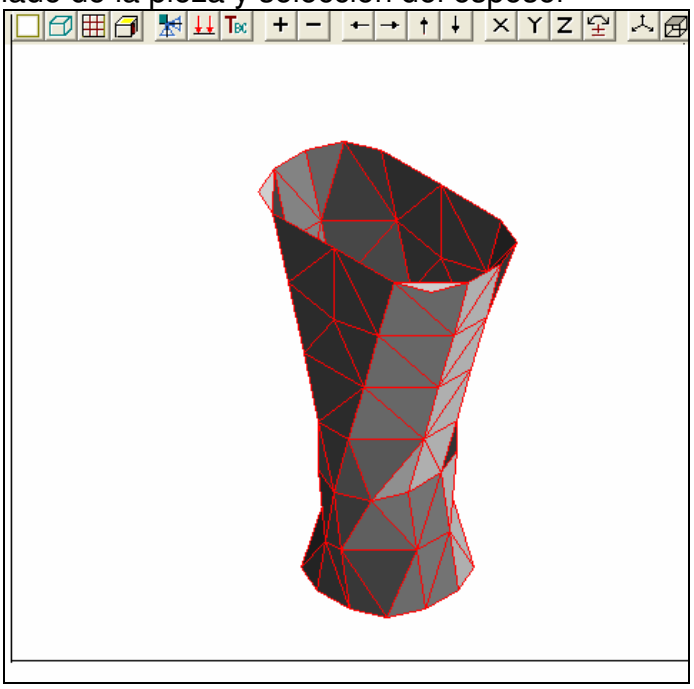
Figura 70. Enmallado de la geometría mediante elementos y nodos



Programa AUTOFEA 9.0

Para este caso, el material escogido es el TMC (*titanium matrix composites*) el cual cuenta con las características de trabajo requeridas tales como elevadas temperatura y presiones, además de un peso mínimo comparado con respecto a otros materiales (ver figura 70).

Figura 71. Enmallado de la pieza y selección del espesor



Programa AutoFEA 9.0

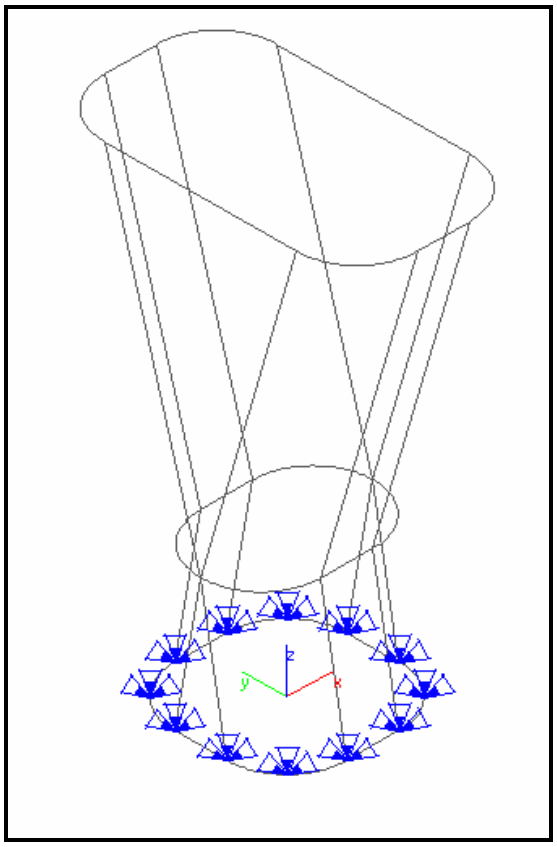
La tarea de Enmallado por Elementos Finitos de la Pieza Soporte es una de las fases más importantes, la figura 71 muestra en detalle la malla en diferentes zonas del modelo, En la opción de enmallado se tomó la configuración de superficie, el cual requería que se seleccionara el espesor de la lámina, para este caso 35 mm ya que con este consigue una deformación mínima para este caso menos de 1mm, este espesor se selecciona experimentalmente para que cumpla con la condición mencionada anteriormente.

El programa AutoFea tienen 2 opciones para seleccionar este espesor, uno es por la ubicación de las láminas con diferentes ángulo, y otro, es mediante la selección directamente un valor.

El valor real de este espesor se determinará por el uso de láminas orientadas en ángulos diferentes, y de esta manera conseguir un espesor mínimo con las

mismas características del espesor seleccionado para este análisis, para efectos de mostrar el comportamiento de este material en condiciones ortotrópicas, el software de simulación permite analizar este modelo como un compuesto con el espesor de 35mm dando las condiciones del material real.

Figura 72. Restricciones



Programa Autofea 9.0

En la figura 72 se muestra no solo las restricciones, sino también la orientación de los tres ejes donde:

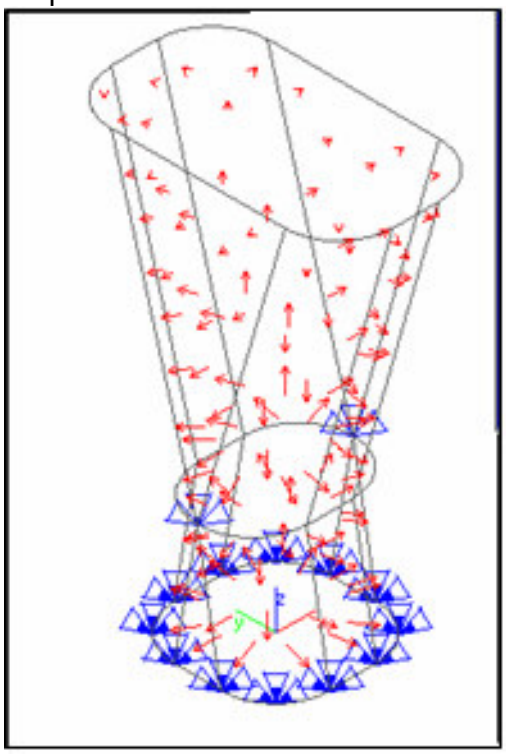
Y- corresponde al largo (eje verde)
X-corresponde al ancho (eje rojo)
Z-corresponde a la profundidad (eje azul)

11.1.3 Aplicación de las condiciones de contorno o restricciones de movimientos. El empotramiento se realiza a la entrada de la tobera ya que este se encuentra acoplado al post - quemador, además de restricciones adicionales de

desplazamiento más no de rotación, se aplicaron a las secciones más críticas de deformación y esfuerzos equivalentes para así dar un lugar al acoplamiento del dispositivo de vectorización de la tobera.

11.1.4 Introducir sistemas de cargas equivalentes que simulen la puesta en servicio de la estructura. A continuación se aplican "**directamente sobre la geometría**" las cargas y condiciones de contorno que soporte la pieza.

Figura 73. Distribución de presiones



AutoFEA 9.0

En la figura 73 se puede observar que se le aplicaron las 2 presiones calculadas en el capítulo de termogasodinámica de la tobera supersónica en los apartados 12 y 21, correspondientes a:

$$P_5 = 365220 \ .2 \ N/m^2$$

$$P^* = 217434 \ .1 \ N/m^2$$

Estas presiones se asumieron variables a la largo de la superficie asumiendo como la presión inicial P_5 y como final P*, dando como resultado una presión distribuida sobre la tobera. De igual manera en la sección divergente se aplicaron las presiones correspondientes a P* y P_7 de los apartados 21 y 22.

$$P_{atm} = P_7 = 22700\, N/m^2$$

11.2. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE ESFUERZOS

La siguiente fase es la resolución del problema, y por último el "Análisis" de los resultados, es decir, la representación en pantalla de desplazamientos y tensiones sobre la pieza deformada.

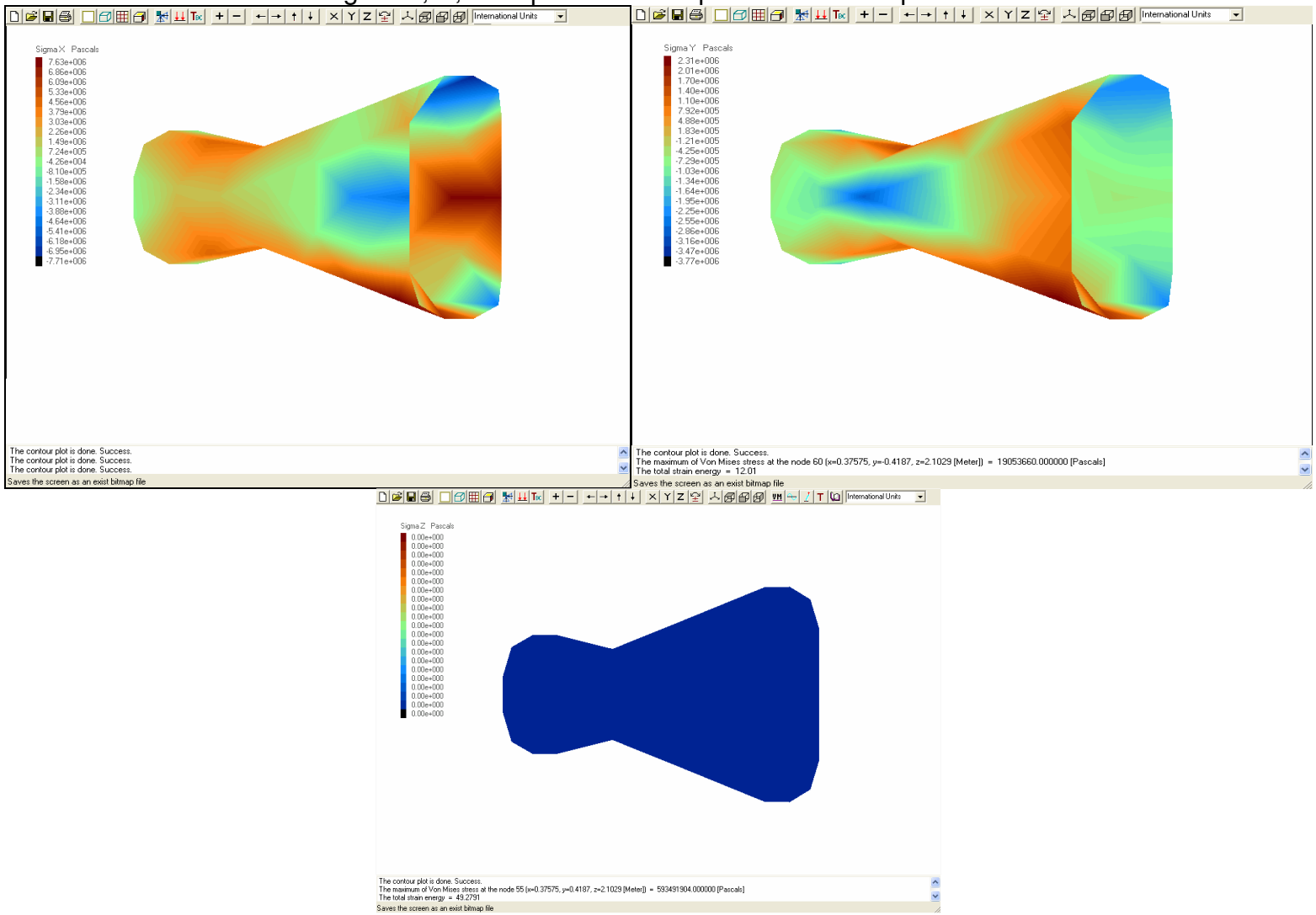
Se pueden realizar tantas simulaciones (llamadas "estudios") como se quiera sometiendo a la pieza a diferentes estados de carga y/o condiciones de sustentación, o probar el comportamiento de la estructura con diferentes materiales y así conocer su resistencia real sin necesidad de construir costosos prototipos físicos.

Ya que se ha demostrado el proceso de simulación de la pieza en la sección convergente de la tobera, el desarrollo de la parte divergente es igual lo que permite analizar el modelo en su totalidad.

Para este caso se considera la presión del flujo de gas a través de la tobera en un momento específico para simplificar esta simulación; los esfuerzos ejercidos en las superficies del modelo son las presiones ejercidas por el fluido circundante. El análisis tiene en cuenta el estado de esfuerzos desarrollado de manera muy general en la sección

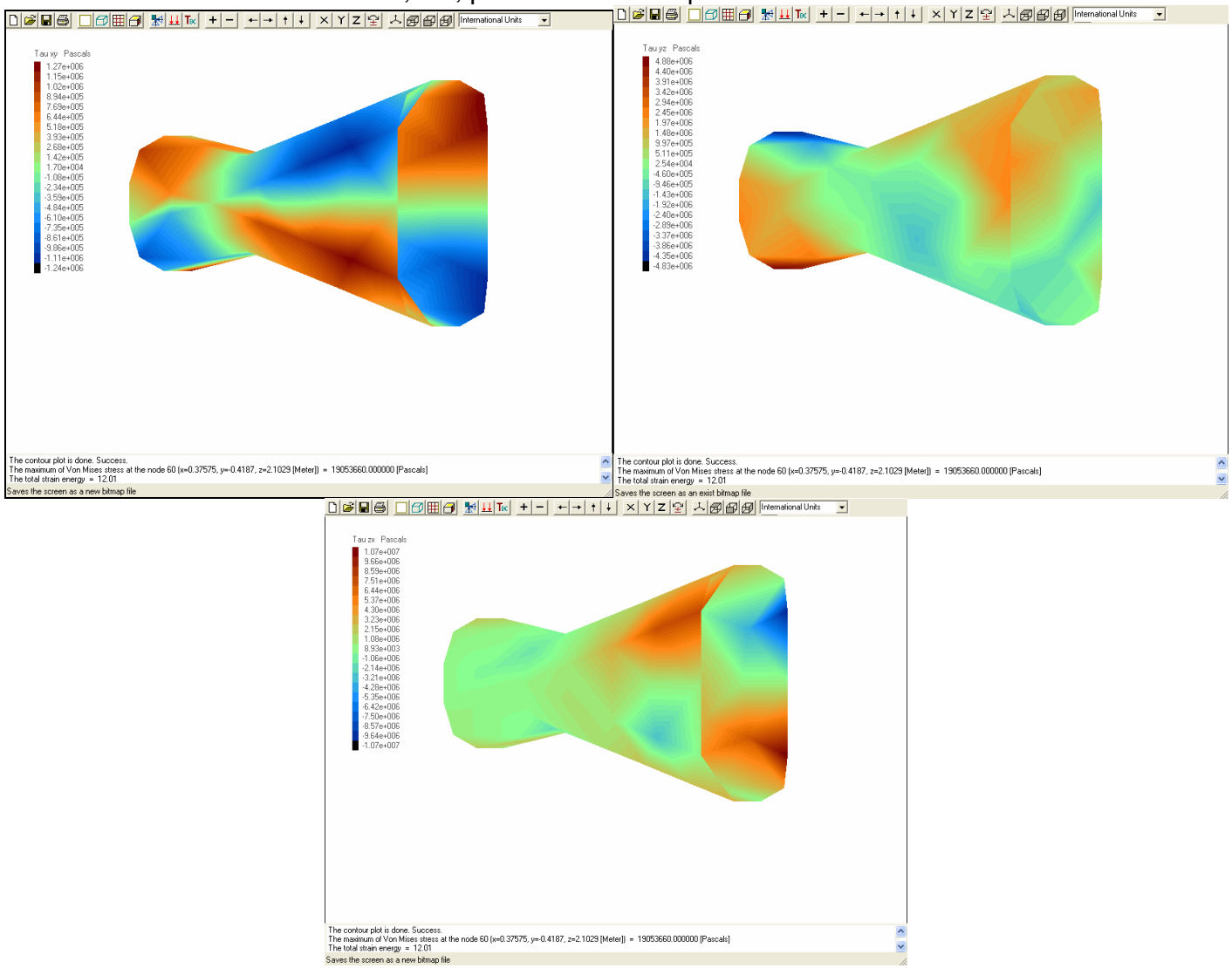
11.2.1 Criterio de von mises. De este modo, si se tiene una solución para un problema, puede tomarse el esfuerzo equivalente de Von Mises directamente a partir de las componentes de esfuerzo y graficarse las regiones de fluencia. De esta manera se determinaron los esfuerzos equivalentes por medio de la ecuación; la ubicación de algunos de los nodos para su mejor visualización se muestra a continuación.

Figura 74. Perfil de esfuerzos Sigma X, Y, Z respectivamente para la tobera supersónica sin vectorización



Programa AutoFEA 9.0

Figura 75. Perfil del esfuerzo cortante XY, YZ, para la tobera supersónica sin vectorización



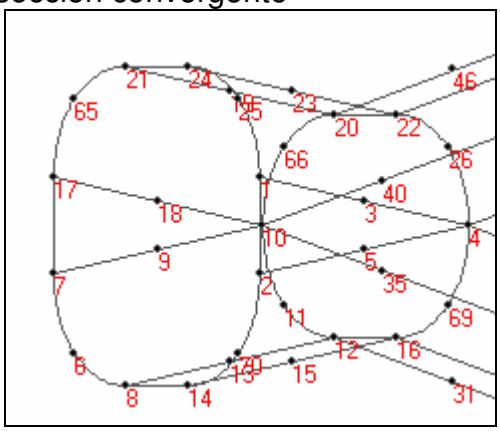
Programa AutoFEA 9.0

Desde el punto de vista estructural la tobera presenta esfuerzos que describen las características de comportamiento del esfuerzo en estados diferentes, permitiendo un análisis de los valores máximos de sus variantes ya sean normales o cortantes.

• Sigma X: Los esfuerzos generados en este eje, aumentan de una manera progresiva en la sección convergente, aunque la grafica no muestra un aumento significativo de los esfuerzos, un análisis detallado indica que en el nodo 2 ubicado en la entrada de la tobera como se visualiza en la figura 76 y el nodo 5 hay un aumento de 2.29e006Pa este valor se obtuvo encontrando la diferencia entre estos nodos, a su vez entre los nodos 5 y 4 hay un aumento de 5.37e005 Pa, esto nos muestra como los cambios en la distribución de presiones afectan el comportamiento de los esfuerzos de tal forma que aunque se muestran constantes existen variaciones importantes entre cada punto. Con respecto a la sección divergente los valores de esfuerzos a tensión y compresión se presentan en la salida de la tobera y corresponde al mismo valor de esfuerzo con signo contrario, estos valores también son los máximos de toda la estructura, con los siguientes datos:

Tensión: **nodo 59** 7.6e006Pa.
Compresión: **nodo 44 -** 7.6e006Pa

Figura 76. Nodos de la sección convergente



Programa AUTOFEA 9.0

• Sigma Y: La distribución de esfuerzos en este eje, muestra que en la sección (5) garganta se presentan esfuerzos a tensión y compresión equivalentes a los valor de, nodo4 -3.7722e006Pa, nodo20 1.3359e006 y nodo22 1.757e006Pa, de

acuerdo a esto podemos analizar que en la sección lateral de la tobera los esfuerzos son máximos y en las caras superiores de esta son mínimos mostrando así que la garganta es la sección mas critica ya que aunque no presenten los valores máximos la diferencia de valores en los nodos es muy grande.

Tensión: **nodo 32** 2.2849e006Pa.
Compresión: **nodo 68 -** 2.62e006Pa

- Sigma Z: De acuerdo a la disposición geométrica de esta simulación, el eje Z corresponde al sentido de orientación de las presiones, por tanto el esfuerzo normal en esta coordenada es igual a cero.

- Cortante XY: los valores de esfuerzo cortante en estos dos ejes, muestran claramente el flujo de este esfuerzo, en todas las secciones de la tobera, cada uno de estos valores negativo y positivo son equivalentes en secciones opuestas para dar paso al flujo. Los valores máximos de este esfuerzo se dan en los nodos 14 y 60 respectivamente como se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.Valores máximos txy nodos 14 y 60

Txy	Tyz	Tzx
1.2705e+006	4.3309e+006	1.1957e+005
-1.3034e+006	6.6202e+005	1.0731e+007

Diseño autor

- Cortante YZ: los valores de esfuerzo cortante en estos dos ejes, no muestran tan claramente el resultado del flujo cortante, este esfuerzo se distribuye proporcionalmente en toda la geometría, excluyendo la entrada de la tobera.

Tabla 4.Valores máximos tzx nodo 8 y 20

Txy	Tyz	Tzx
-5.2003e+005	4.8818e+006	1.3817e+006
-2.4946e+005	-9.1299e+004	-1.4212e+006

Diseño autor

- Cortante ZX: los valores de esfuerzo cortante en estos dos ejes son máximos en la sección (7), y se reducen a una pequeña zona, la mayor parte de la tobera soporta esfuerzos a tensión.

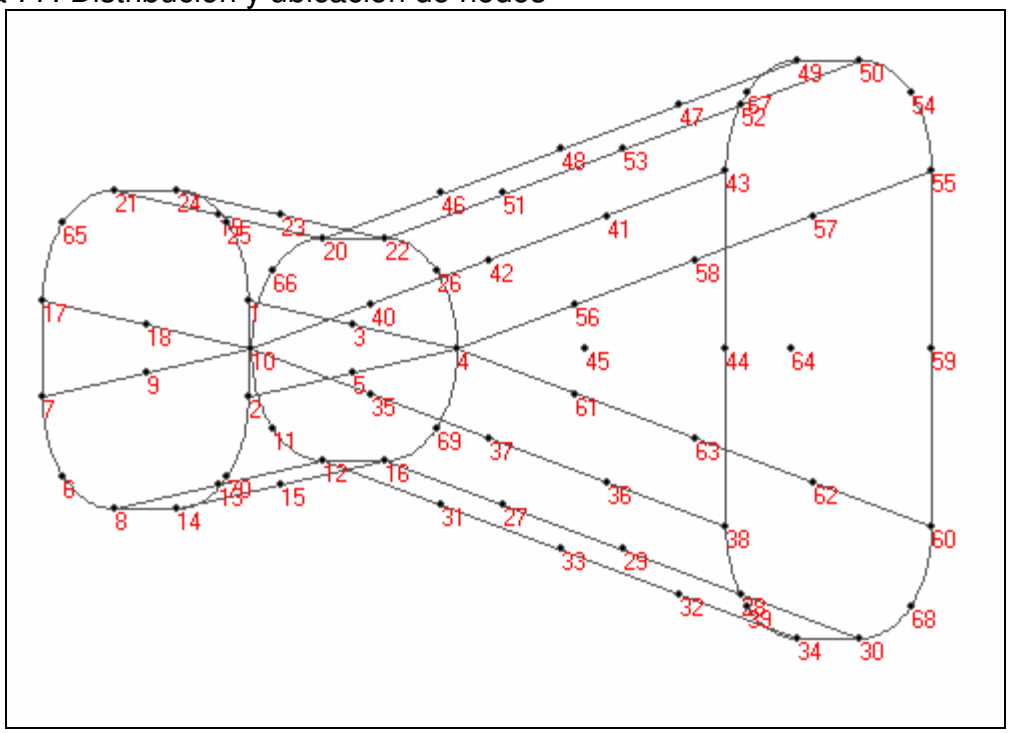
Tabla 5.Valores máximos tzx nodos 43 y 57

Txy	Tyz	Tzx
-8.0062e+005	1.9334e+006	7.3468e+006
9.8750e+005	9.4092e+005	-4.3918e+006

Diseño autor

11.2.2 Esfuerzo equivalente de Von mises. Los esfuerzos máximos equivalentes se encuentran ubicados en el nodo 55 y 60, para demostrar la validez de estas ecuaciones se desarrollo teóricamente el valor de este esfuerzo de acuerdo a los datos obtenidos en las graficas anteriores para el nodo 55, como sigue a continuación:

Figura 77. Distribución y ubicación de nodos



Programa AUTOFEA 10.0

Ahora utilizando el criterio de Von mises, se procederá a calcular el valor del esfuerzo equivalente teniendo en cuenta los valores que han sido determinados previamente por el análisis de elementos finitos. De esta manera reemplazando en la ecuación con los siguientes valores:

$$\sigma_X = 2.3957e006Pa$$

$$\boxed{\sigma_Y = -1.4397e006Pa}$$

$$\boxed{\sigma_Z = 0Pa}$$

$$\boxed{\tau_{XY} = -1.3034e006Pa}$$

$$\boxed{\tau_{YZ} = 6.6202e005Pa}$$

$$\boxed{\tau_{XZ} = 1.0731e007Pa}$$

Se tiene:

$$(\sigma_M) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_Y - \sigma_Z)^2 + (\sigma_x - \sigma_{Zy})^2 + 6\left[(\tau_{XY})^2 + (\tau_{YZ})^2 + (\tau_{XZ})^2\right]\right]}$$

$$\boxed{\sigma_M = 1.9053e007Pa}$$

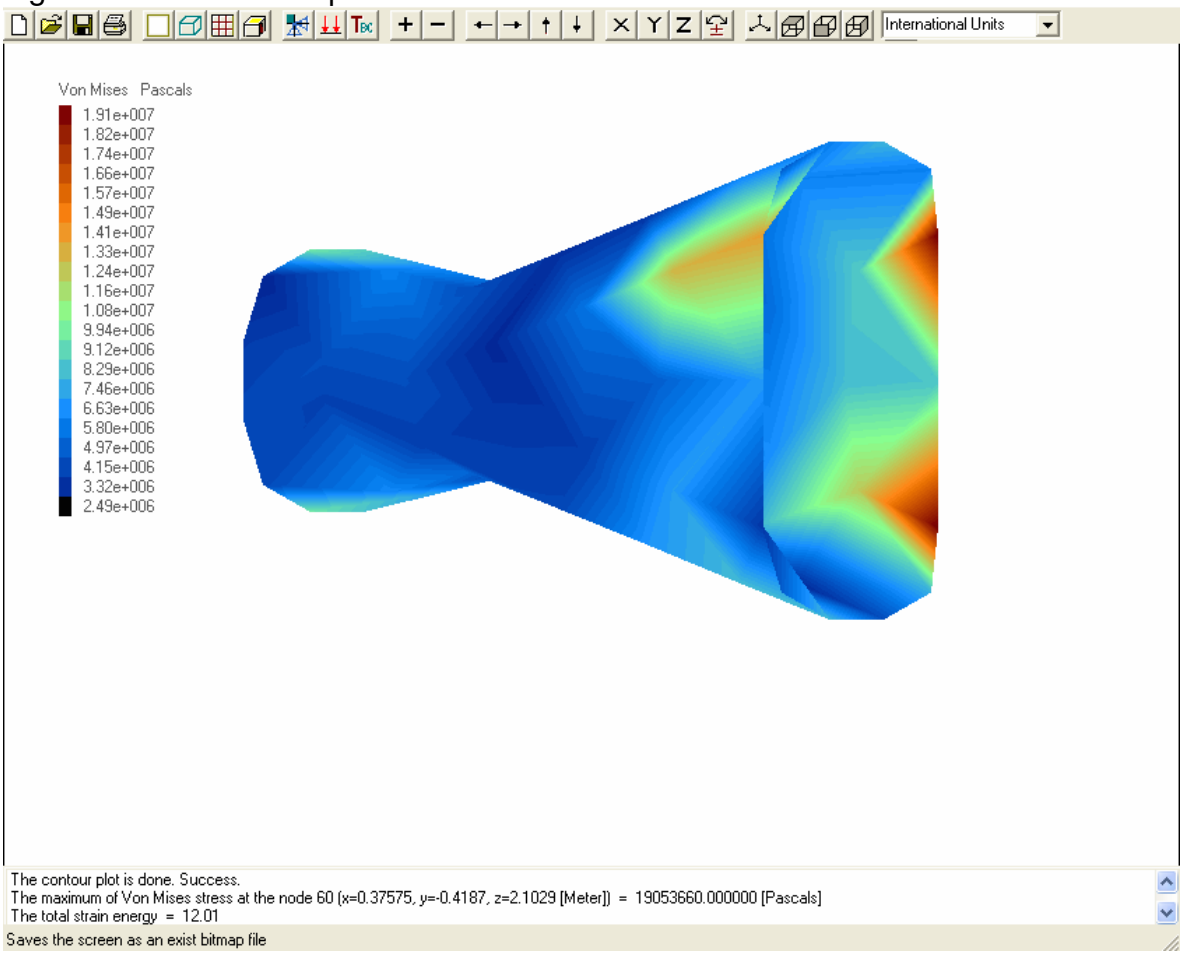
Se observa que existen 2 formas para corroborar el resultado manualmente o por las respectivas simulaciones.

11.2.3 Esfuerzo equivalente de Von mises por simulación. Un análisis detallado de los valores obtenidos de esta simulación muestra que hay una acumulación de esfuerzos en las zonas de transición de la tobera, en las que la geometría sufre un cambio y por lo tanto los esfuerzos son críticos, es decir, en el nodo 43, 55 y 60 el valor de esfuerzo equivalente oscila entre 1.33e007Pa y 1.905e007Pa, comportándose a tensión mostrando un comportamiento que define las secciones más susceptibles de falla para este diseño.

Ya que la figura 78 muestra que la mayor parte de la tobera se comporta uniformemente, el análisis para cada nodo muestra que:

Nodo 5 4.7007e006 Pa valores para la garganta
Nodo 18 3.9141e006 Pa valores para la parte convergente
Nodo 45 4.5172e006 Pa valores para la parte divergente

Figura 78. Esfuerzo equivalente de von mises



Programa AutoFEA 9.0

Los datos indican que la estructura no presenta un comportamiento tan homogéneo, ya que los valores para las diferentes secciones están mostrando una variación de 7.87e005Pa entre la sección convergente y la garganta y de 6.03e005 Pa

11.2.4 Componentes de la deformación. Se dice que un material es elástico cuando el estado de esfuerzo en un punto es una función con un solo valor habitual de deformación en ese punto; la mayoría de los metales sometidos a variaciones limitadas de temperatura y esfuerzo se pueden modelar de manera adecuada al asumir que son elásticos; los datos obtenidos en la simulación del programa AutoFEA 9.0 (figura 79 y 80), se basaron en las siguientes ecuaciones, para un plano determinado:

$$\varepsilon_X = \frac{1}{E} \bullet \sigma_X - \frac{\upsilon}{E}(\sigma_Y + \sigma_Z)$$

$$\varepsilon_Y = \frac{1}{E} \bullet \sigma_Y - \frac{\upsilon}{E}(\sigma_X + \sigma_Z)$$

$$\varepsilon_Z = \frac{1}{E} \bullet \sigma_Z - \frac{\upsilon}{E}(\sigma_X + \sigma_Y)$$

$$\gamma_{XY} = \frac{1}{G}\tau_{XY} \qquad \gamma_{YZ} = \frac{1}{G}\tau_{YZ} \qquad \gamma_{XZ} = \frac{1}{G}\tau_{XZ}$$

ε_X - Deformación en el eje x.
E - Módulo de Young.
G - Módulo de corte (shear modulus).
τ_{XY} - Esfuerzo cortante en los planos x-y.
τ_{YZ} - Esfuerzo cortante en los planos y-z.
τ_{XZ} - Esfuerzo cortante en los planos x-z.

El análisis detallado de los valores encontrados para los nodos mostrados anteriormente, que representan la mayor parte de la tobera, en la que a primera vista no hay grandes cambios, indican que existe una variación importante en la que se puede determinar que los rangos de deformación de la sección convergente oscilan entre 4.25e-005m y 1.70e-004m, y los valores máximos de deformación se dan en los nodos 44 y 59, equivalentes a la sección lateral de la tobera.

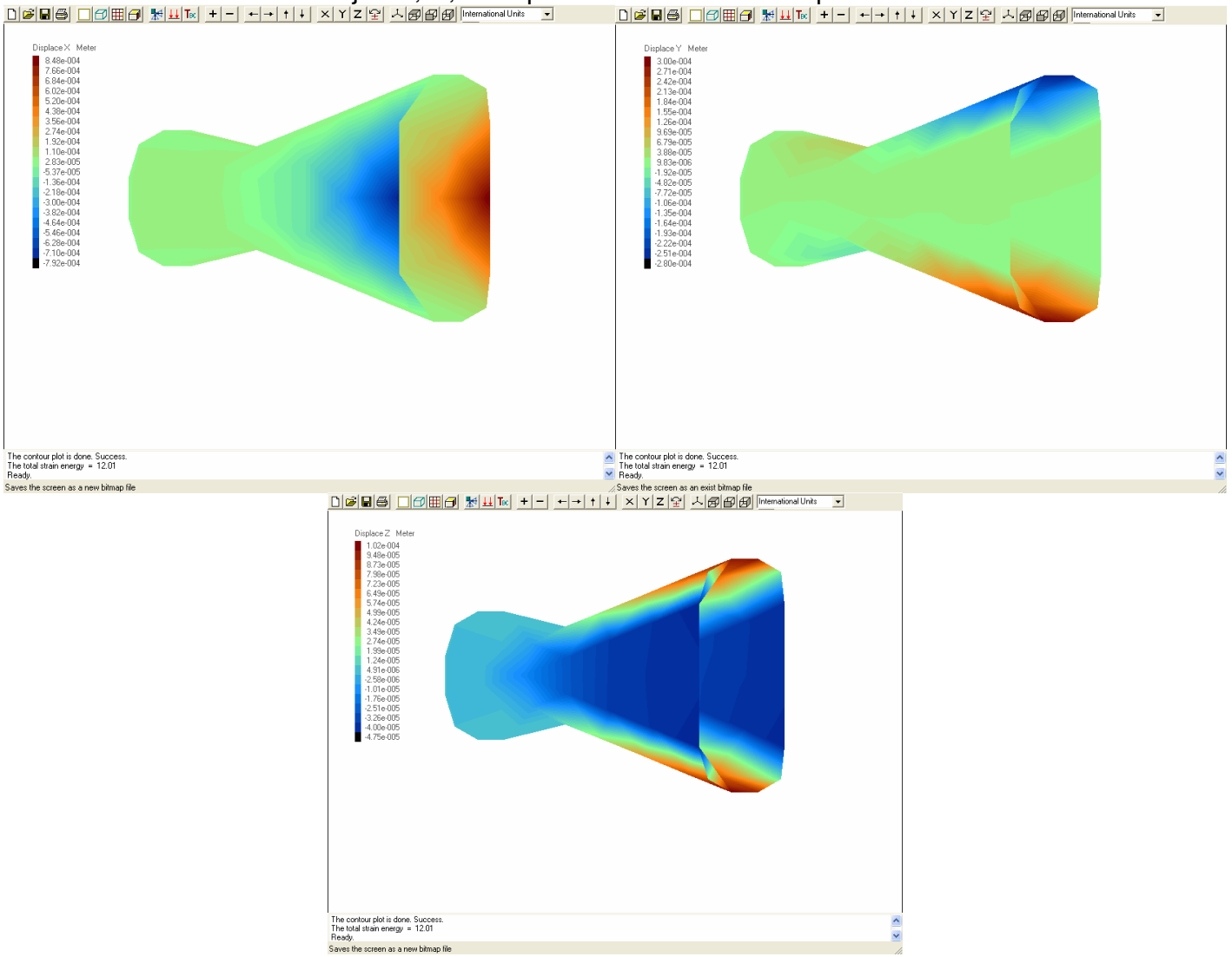
- **Desplazamiento en X**: El desplazamiento generado en la tobera en el eje X, es uniforme en la sección convergente, mientras que en la sección divergente se presentan desplazamientos a tensión y compresión equivalentes generados por el flujo de cortante paralelo a la superficie. los valores máximos de este esfuerzo se ajustan a la deformación permisible.

Tabla 6. Valores máximos desplazamiento en X nodos 44 y 59

Dx	Dy	Dz
-7.9170e-004	1.5246e-006	-4.3862e-005
8.4840e-004	-1.2071e-006	-4.4146e-005

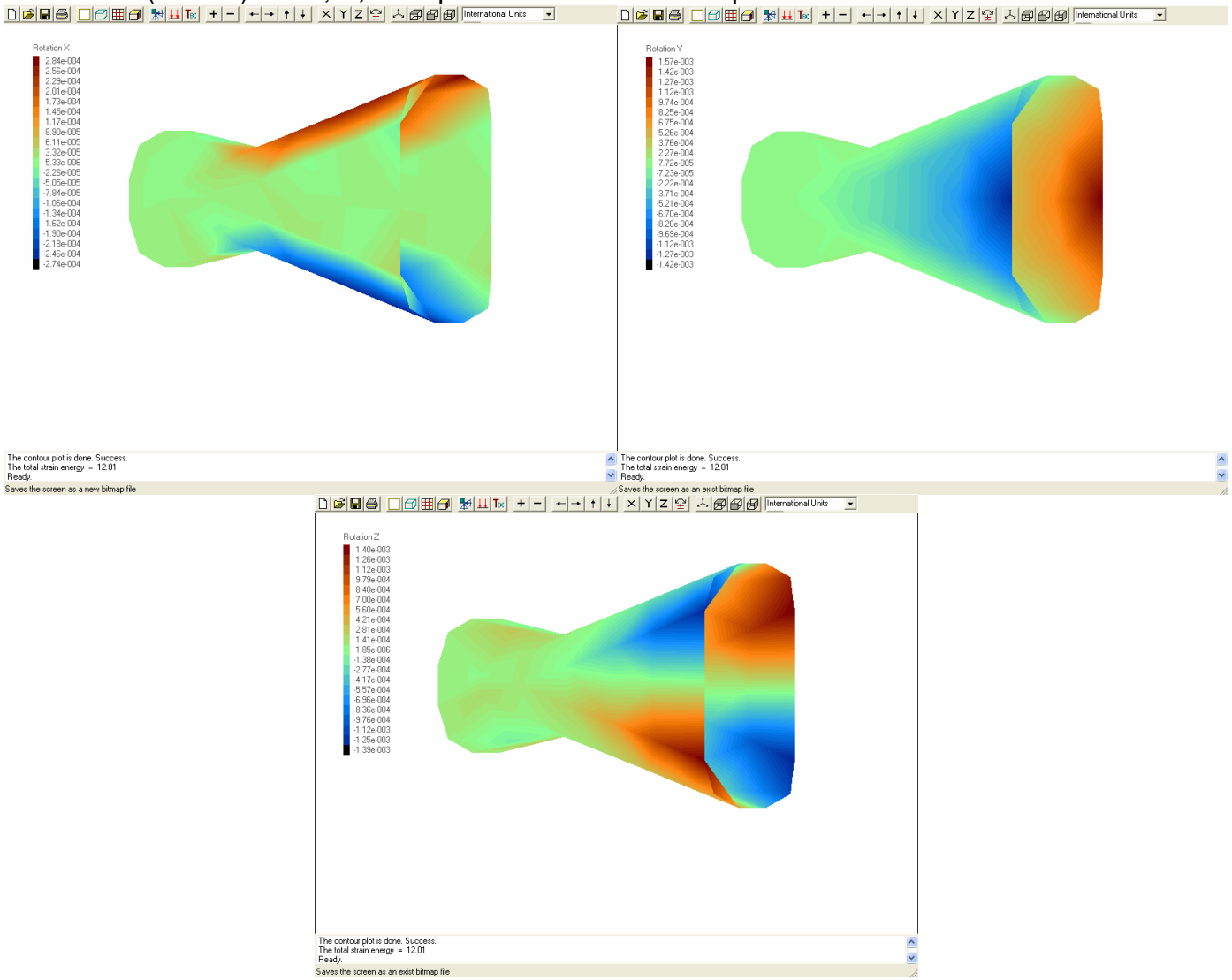
Diseño autor

Figura 79. Perfil de deformación en ejes X, Y, Z respectivamente tobera supersónica sin vectorización



Programa AutoFEA 10.0

Figura 80. Rotación (torsión) en X, Y, Z respectivamente tobera supersónica sin vectorización



Programa AutoFEA 10.0

• **Desplazamiento en Y**: de igual manera que el desplazamiento generado en X, los valores de deformación en Y se presentan a tensión y compresión pero en la sección superior de la tobera, los valores de deformación mayores son iguales pero de signo contrario a tensión y compresión. los valores máximos de este esfuerzo se ajustan a la deformación son aceptables.

Tabla 7. Valores máximos desplazamiento en Y nodos 34 y 50

Dx	Dy	Dz
8.3422e-006	2.9999e-004	1.0232e-004
8.8170e-007	-2.8014e-004	9.4355e-005

Diseño autor

• **Desplazamiento en Z**: la mayor parte de la deformación se presenta a compresión en este eje, las deformaciones a tensión se reducen a la zona superior de la tobera y son reducidos en comparación al desplazamiento por compresión.

Tabla 8. Valores máximos desplazamiento en Z nodos 34 y 38

Dx	Dy	Dz
8.3422e-006	2.9999e-004	1.0232e-004
-3.0494e-004	-3.8102e-006	-4.7542e-005

Diseño autor

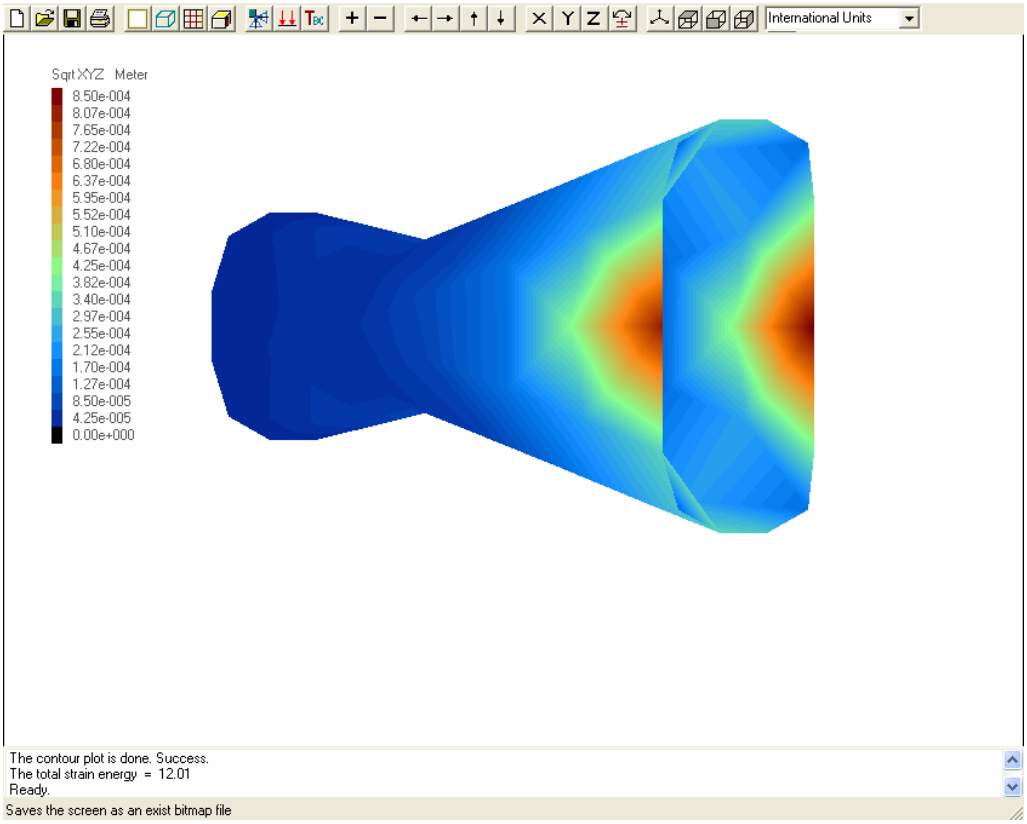
• **Rotación en X o torsión.** El desplazamiento generado en el eje X, por la rotación dada por el sentido de las cargas, es similar al desplazamiento en Y, los valores de esta rotación se dan a compresión en la parte inferior de la tobera y a tensión en la parte superior de la tobera. Los valores de esta deformación son máximos en el nodo 50 (2.84e-004m) y en el 34 (2.7366e-004m)

• **Rotación en Y.** El desplazamiento generado en el eje Y, por la rotación dada por el sentido de las cargas, es similar al desplazamiento en X, los valores de esta rotación se dan a compresión en la parte lateral de la tobera y a tensión en la parte opuesta de la tobera. Los valores de esta deformación son máximos y permisibles en el nodo 59 (1.5720e-003m) y en el 44 (1.4176e-003m)

• **Rotación en Z.** El desplazamiento generado en el eje Z, por la rotación dada por el sentido de las cargas, es una clara descripción del flujo de cortante ya que se dan desplazamientos a tensión y compresión distribuidas y opuestas cada uno generando así un flujo correspondiente a las predicciones teóricas conocidas. Los

valores de esta deformación son máximos en el nodo 55 (1.3982e-003m) y en el 60 (-1.3945e-003m).

Figura 81. Perfil de deformación total resultante para la tobera supersónica sin vectorización



Programa AutoFEA 10.0

11.2.5 Deformación total. Según las gráficas y la figura 81 se puede deducir que para el análisis de desplazamiento total los valores de deformación total son mínimos en la sección convergente de 0m, donde las restricciones limitan las deformaciones, por otra parte en la sección divergente los valores máximos de deformación se dan en la salida de la tobera, y son iguales a 8.4955e-004m.

Tabla 9. Deformación total máxima nodo 59

Dxyz	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
8.4955e-004	8.4840e-004	-1.2071e-006	-4.4146e-005	5.2458e-007	1.5720e-003	1.5106e-005

Diseño autor

La simulación indica que para el nodo 59 la deformación es máxima y se ajusta a los requerimientos de diseño tales como una deformación menor a 1mm

Nodo 5 1.7592E-005m valores para la garganta
Nodo 18 1.4520e-005 m valores para la parte convergente
Nodo 45 3.8573e-004 m valores para la parte divergente

11.3 ANÁLISIS BÁSICO TÉRMICO

En esta sección se hará un análisis térmico básico, ya que este tema como se mencionó en las limitantes no es estudio de este proyecto. Se verá la influencia de las temperaturas producidas en el proceso de post - combustión P_5 y su impacto en el análisis de esfuerzos.

Este análisis define el comportamiento de **Termo elasticidad** ya que es un modelo del estudio de los materiales que explica los efectos de la temperatura y sus respectivas deformaciones.

$$\frac{C * L}{E * A} = \alpha * \Delta T * L$$

Con la anterior ecuación se puede deducir que en este modelo la relación entre el Esfuerzo y la Deformación son independientes de la temperatura.

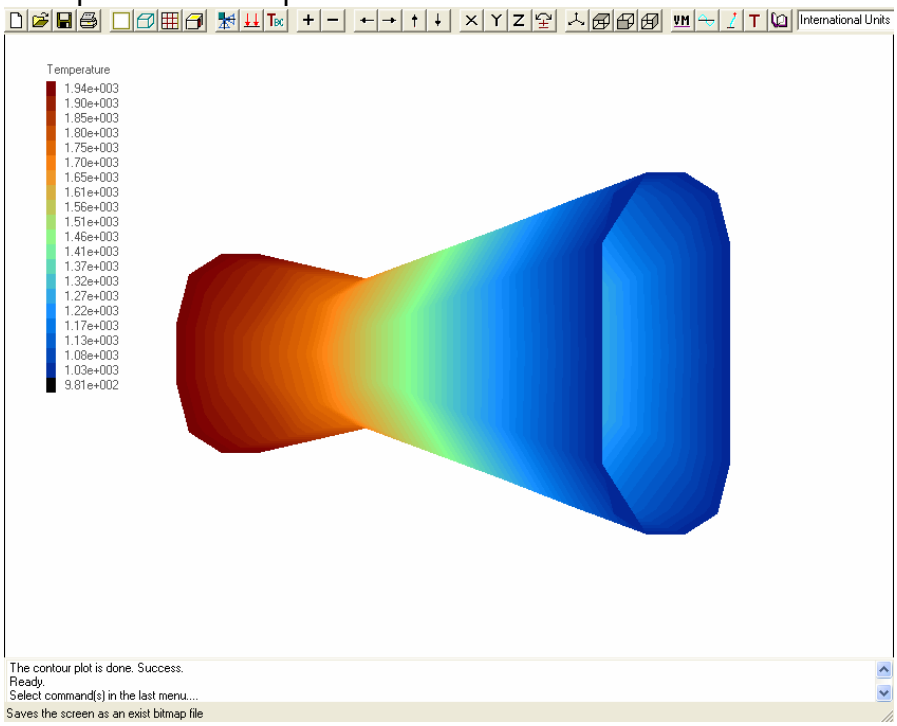
Las temperaturas utilizadas en este análisis corresponde a las temperaturas estáticas correspondientes a T5, T* y T7, definidas por las secciones características para el diseño realizadas anteriormente para el Número de Mach calculado de M = 2.51 donde:

$$T_5 = 1943.582^o K$$

$$T^* = 1716.74° K$$

$$T_7 = 980.624° K$$

Figura 82. Temperaturas de operación



Programa AutoFEA 10.0

En la figura 82 se muestran la temperaturas en cada sección de la tobera corroborando los datos ya que todos estos parámetros concuerdan y fueron obtenidos en el análisis termogasodinámico. Según la figura 82, las temperaturas de entrada se encuentran entre:

$$\boxed{T_5 = 1940^o K}$$

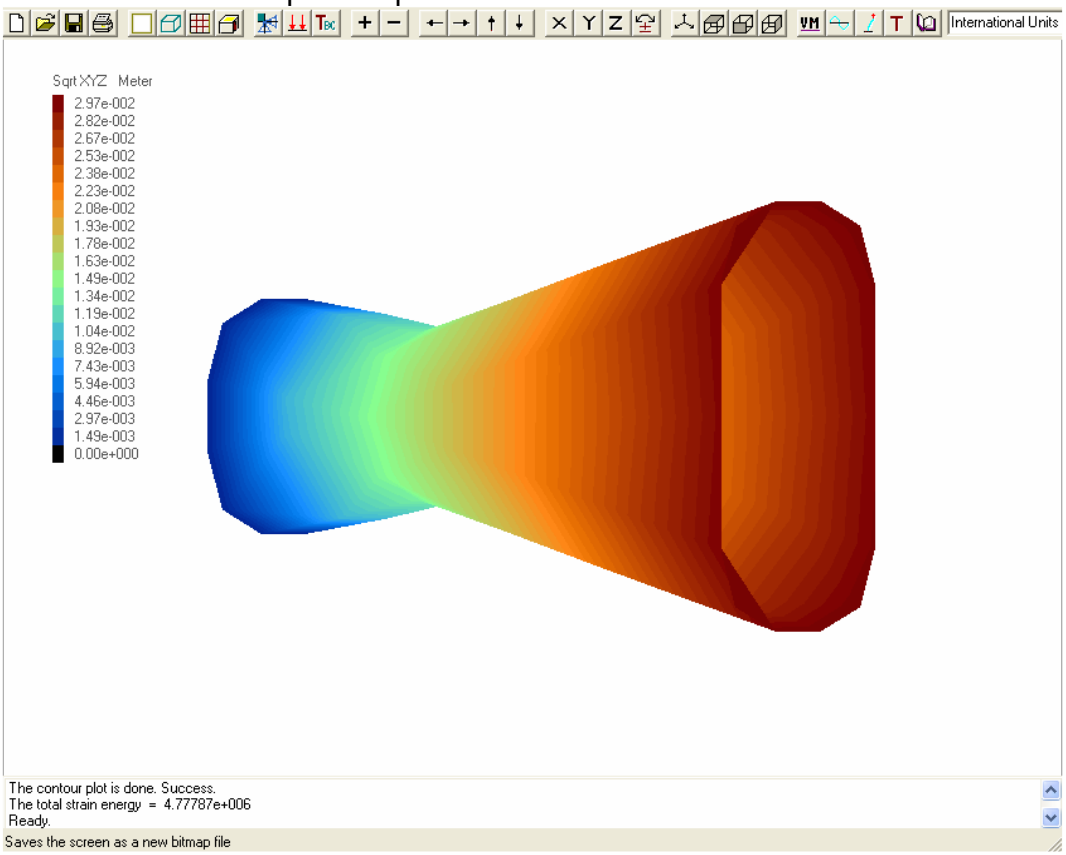
$$\boxed{T^* = 1700° K}$$

$$\boxed{T_7 = 981° K}$$

Con los datos mencionados se observa que el margen de error respecto a cada temperatura es muy mínimo.

En la gráfica 83, se muestra que la mayor dilatación se da en la sección de salida de la tobera ya que aunque las mayores temperaturas se dan en la entrada de la tobera, las restricciones disminuyen notablemente la dilatación.

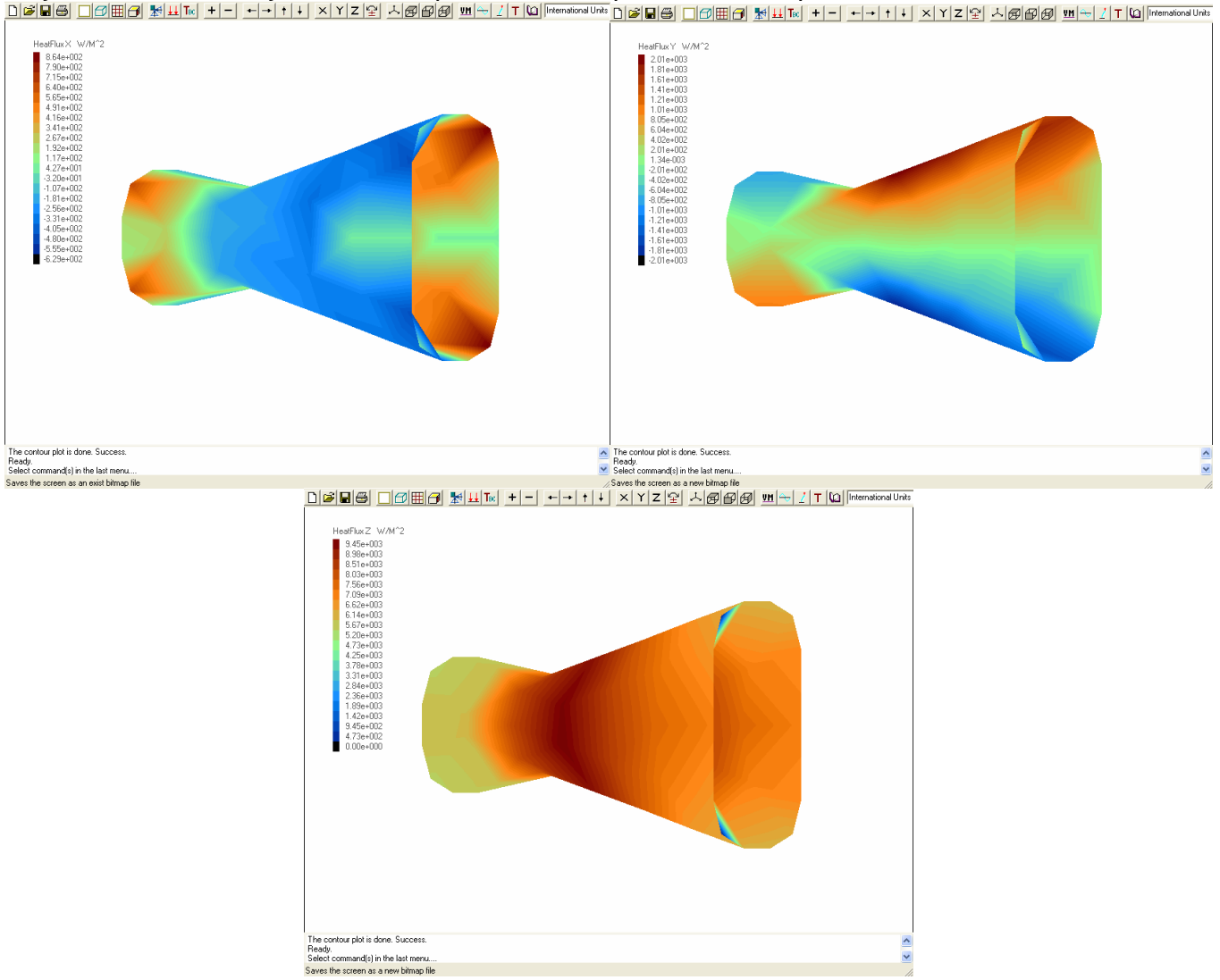
Figura 83. Deformación por temperatura



Programa AUTOFEA 9.0

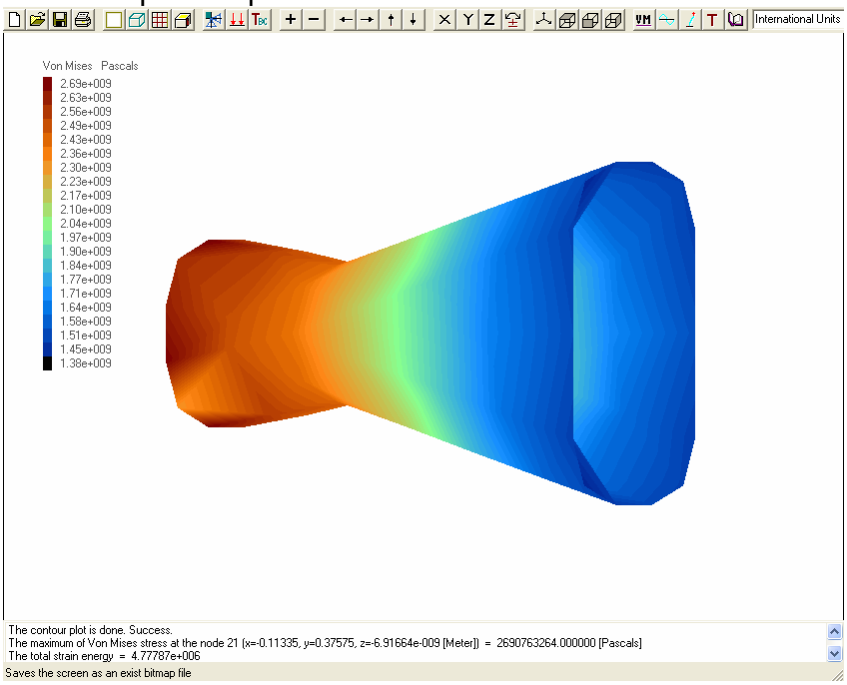
En la gráfica 84 se muestra el flujo de calor en los tres ejes, el cual fue desarrollado por el programa de acuerdo a las características térmicas del material, donde se tuvieron en cuenta factores tales como coeficientes de expansión térmica en lo 3 ejes y coeficientes de conductividad.

Figura 84. Flujo de calor en el eje X, Y, Z respectivamente para tobera supersónica sin vectorizar



Programa AUTOFEA 9.0

Figura 85. Esfuerzos por temperatura



Programa AUTOFEA 9.0

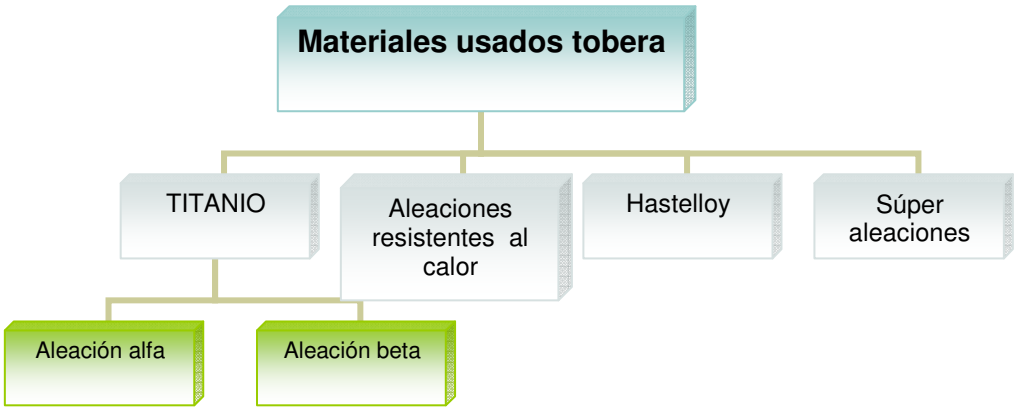
En la gráfica 85, se muestra que la mayor dilatación se da en la sección de entrada de la tobera ya que se presentan las mayores temperaturas y presiones, las cuales son generados o vienen de otro componente el cual genera un incremento de dichos parámetros, cuando se realizo este análisis no se colocaron las restricciones para simular las condiciones del otro elemento en este caso un post-quemador.

11.4 SELECCIÓN DEL MATERIAL

En este capítulo se analizaron algunos materiales utilizados en toberas como los son titanio y materiales cerámicos y realizando una comparación respecto a otros materiales en cuanto a peso, deformaciones y esfuerzos de esta manera se llego a elegir un material adecuado el cual soporte altas temperaturas para este caso es de 2000^0K, dicha temperatura genera grandes esfuerzos térmicos sobre la estructura y con un peso mínimo factor importante en la industria aeronáutica.

El siguiente esquema muestra cuales son los materiales mas utilizados para la construcción de toberas.

Figura 86. Materiales usados en toberas



Diseño del autor

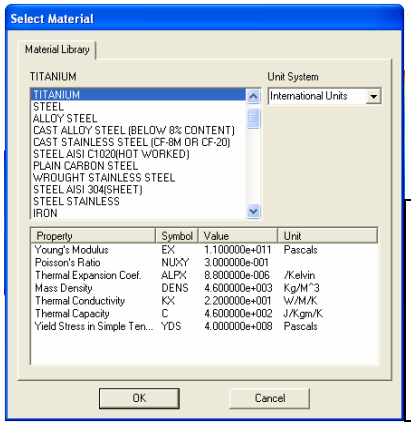
La industria aeronáutica esta en constante cambio y con ello el desarrollo de nuevas tecnologías de punta, para mejorar el rendimiento de los diferentes componentes y de esta manera conseguir minimizar los costos de producción. Unos de estos avances en la industria aeronáutica es la implementación de nuevos materiales.

Para el desarrollo de este proyecto es muy importante conocer las propiedades mecánicas de un material, para seleccionarlo, ya que este material necesita soportar diferentes esfuerzos y temperaturas, conseguido con este análisis un material que se adapte a dichas cualidades de trabajo. Cabe resaltar que el parámetro mas determinante para la selección es la resistencia a la temperatura del material.

11.4.1 Análisis para diferentes tipos de materiales. Por lo anterior, y observando las características de los principales materiales utilizados en toberas, se llegó a la conclusión que el material que se ajusta mejor a los requerimientos solicitados para el proyecto es un material COMPUESTO CON MATRIZ DE TITANIO y refuerzo de SILICA ya que soportaba la temperatura de operación con un peso mínimo. A continuación se muestra una reseña de este material y la comparación con diferentes tipos de materiales y aleaciones utilizadas en aviación.

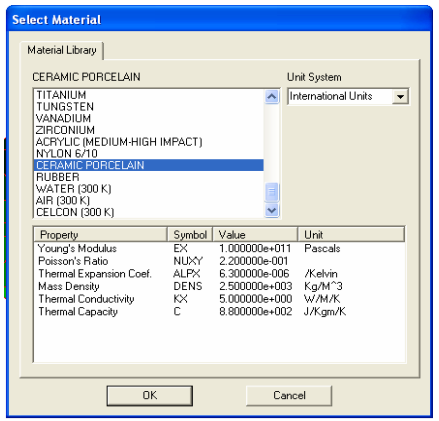
Figura 87. Características del titanio, acero, cerámico y aleaciones de magnesio

TITANIO

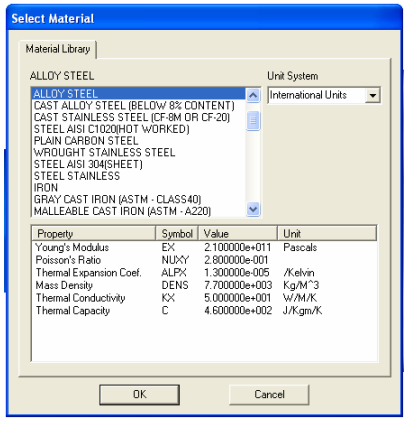


Total Nodes = 70
Total Elements = 114
Total Volume = 0.0507983 (Meter^3)
Total Mass = 233.672 (Kgmass)
The Gravity Center (CG)
CGx = 0.000446 (Meter)
CGy = -0.000000 (Meter)
CGz = 1.154971 (Meter)

CERAMICO

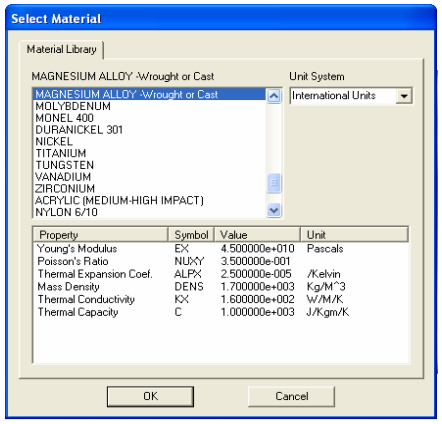


ALEACIONES ACERO



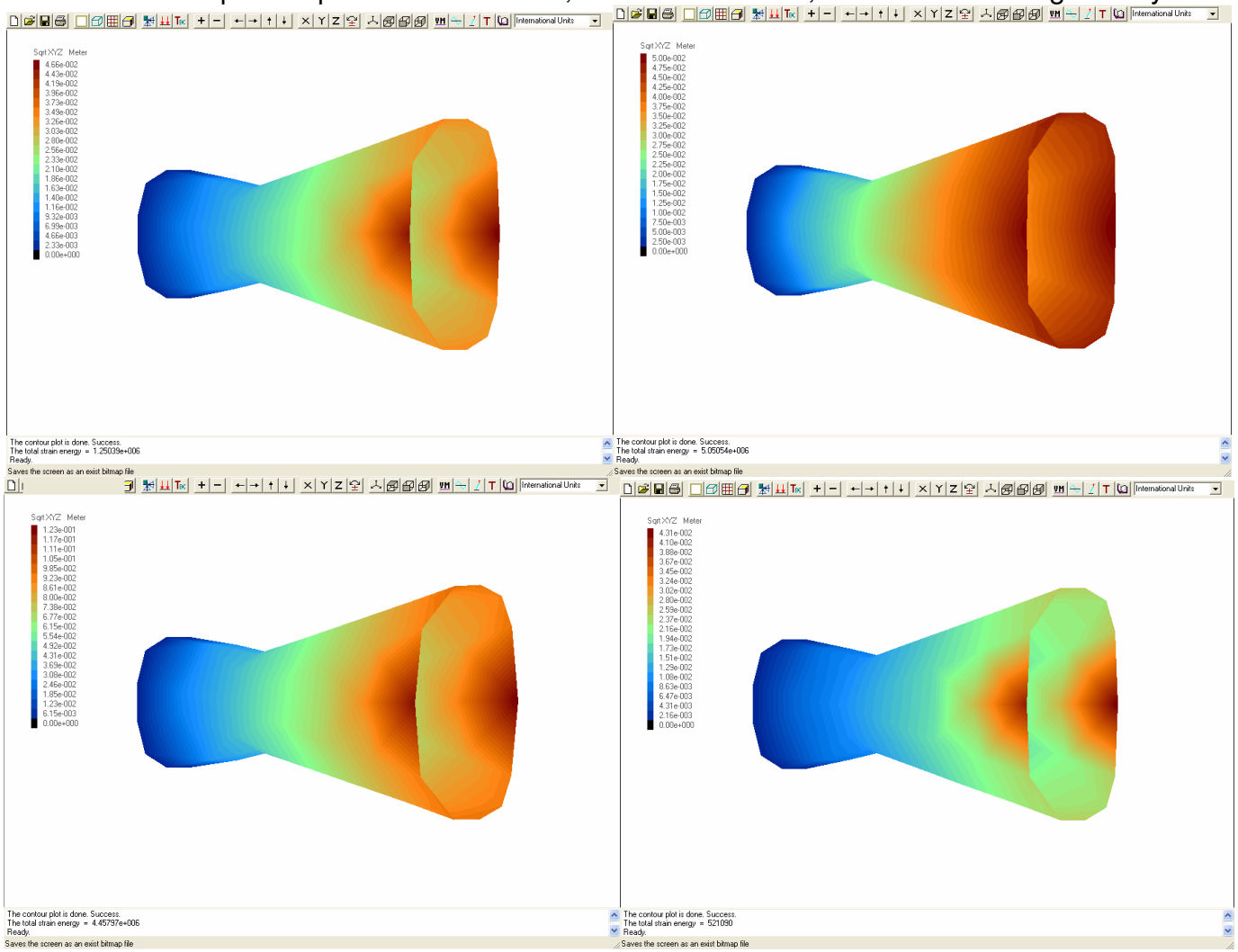
Total Nodes = 70
Total Elements = 114
Total Volume = 0.0507983 (Meter^3)
Total Mass = 391.147 (Kgmass)
The Gravity Center (CG)
CGx = 0.000446 (Meter)
CGy = -0.000000 (Meter)
CGz = 1.154971 (Meter)

ALEACIONES MAGNESIO



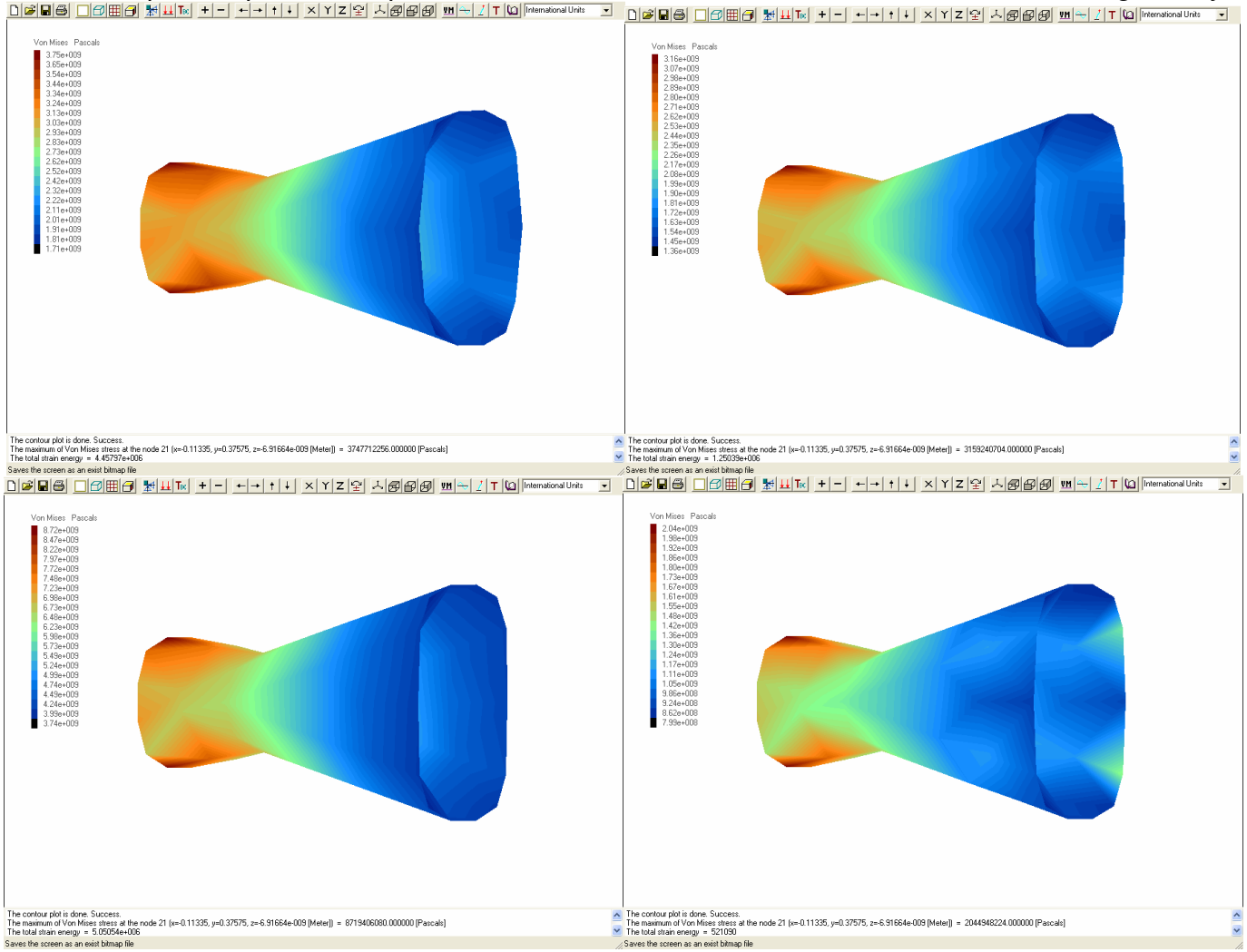
Programa AutoFEA 9.0

Figura 88. Deformaciones por temperatura del titanio, aleación de acero, aleaciones de magnesio y cerámico



Programa AutoFEA 9.0

Figura 89. Esfuerzos por temperatura equivalentes del titanio, aleación de acero, aleación de magnesio y cerámico



Programa AutoFEA 9.0

11.5.2 Análisis de resultados comparación de la matriz de titanio con respecto a otros materiales. Para determinar las ventajas y desventajas de los materiales que pueden ser utilizados en la construcción de una tobera con este tipo de características, los resultados obtenidos en la simulación de elementos de finitos (figuras 87, 88 y 89) determinó los valores de esfuerzo y deformación máximos por carga y temperatura, estableciendo de esta forma las dilataciones que son un factor importante al trabajar con elevadas temperaturas, y los esfuerzos que esto provoca, ya que muchos de estos materiales pueden soportar las presiones de operación pero no las temperaturas. Cada uno de las simulaciones se realizo para un mismo espesor preliminar para todos los materiales, para establecer las ventajas de peso de la tobera.

Los valores de deformación obtenidos mostraron que entre los metales el titanio posee las mejores características térmicas, igualmente el material cerámico demuestra ser el más apropiado pero se descarta por los valores de esfuerzos permisibles por cargas.

Tabla 10. Comparación de materiales respecto a deformación

	Deformación total (m)
TITANIO	4,66E-02
ALEACIONES DE ACERO	5,00E-02
ALEACIONES DE Al	1,00E-01
MAGNESIO	1,23E-01
CERAMICOS	4,31E-02

Diseño autor

Tabla 11. Comparación de materiales respecto a esfuerzos

	Esfuerzo von mises (Pa)
TITANIO	3,16E+09
ALEACIONES DE ACERO	8,72E+09
ALEACIONES DE Al	5,43E+09
MAGNESIO	3,75E+09
CERAMICOS	2,00E+09

Diseño del autor

Los valores de deformación por temperatura muestran que el titanio y los materiales cerámicos cumplen con los requerimientos de diseño, las ventajas de estos dos materiales muestran que una combinación de estos es la solución más apropiada para soportar las presiones y la temperatura.

Tabla 12. Comparación de materiales respecto a masa total

	Masa total (Kgmass)
TITANIO	233,672
ALEACIONES DE ACERO	391,147
ALEACIONES DE Al	137,155
MAGNESIO	86,357
CERAMICOS	126,996

Diseño del autor

Los valores de masa total de la tobera determinan un factor importante en la selección del material ya que este tipo de dispositivos se caracterizan por la búsqueda de reducción de peso, para este análisis el Titanio sigue siendo el material con las características más apropiadas. Un análisis más detallado de la simulación de elementos finitos muestra que:

- **Titanio**: La deformación en la sección de salida es mayor, y mucho menor en la sección convergente por las restricciones de la tobera, de manera contraria los esfuerzos son máximos en la sección (5) ya que los valores de presión y temperaturas son máximos en este punto.

- **Acero**: De igual manera que el titanio este metal tiene características similares por las propiedades de conducción térmica de estos materiales, la deformación es máxima en la sección (7) y los esfuerzos son máximos en la sección (5).

- Los metales como el aluminio y el magnesio muestran un comportamiento similar de distribución de dilataciones de la tobera y de igual manera de esfuerzos, estos muestra las ventajas de usar un metal como material de diseño, aunque el comportamiento de estos sea similar los valores arrojados en este análisis indican que el titanio es el material más adecuado.

- **Cerámicos**: Como material alternativo al Titanio los materiales cerámicos muestran que los valores de dilatación son máximos en la sección (7) pero se concentran en una zona reducida, la deformación tiene un comportamiento similar al de los metales pero sus propiedades de conductividad y expansión térmica hacen que sus valores sean pequeños.

Aunque el material cerámico muestra tener características excelentes, por si solo no tendría la capacidad de soportar las presiones de este diseño, lo que muestra que la alternativa más apropiada es el uso de materiales compuestos en los que

las características del titanio de peso y de cargas, combinadas con las ventajas térmicas de un material cerámico son la mejor solución.

- **Compuestos de matriz metálica (MMC**). El termino MMC (metal matrix composites) define a los nuevos materiales avanzados en los que el material incrustado es una fibra o cerámica pulverizada; la matriz es un metal de baja densidad (Aluminio, Magnesio o Titanio). El refuerzo es casi siempre SiC, Al_2O_3, (alumina) o Carbón.

Las características de operación de esta tobera requieren por tanto del uso de un material como el SiC-Ti-6Al-4V, que ofrece las condiciones requeridas de diseño; como ventajas a otros materiales este compuesto tiene:

Comparado a metales monolíticos:

- Alta resistencia a ratas de densidad
- Alta rigidez a ratas de densidad
- Mejor resistencia a la fatiga
- Mejores propiedades a altas temperaturas
- Alta resistencia
- Coeficientes bajos de expansión térmica
- Mejor resistencia al deterioro.

Ventajas sobre compuestos de matriz polimérica:

- Alta capacidad a elevadas temperaturas
- Resistencia al fuego
- Alta rigidez y resistencia transversal.
- No hay absorción de humedad
- Alta conductividad eléctrica y térmica
- Mejor resistencia a la radiación
- El trabajo con filamentos y refuerzos de MMC se puede realizar con equipo usado en metales comunes.

Algunas desventajas son:

- Alto costo de algunos sistemas de materiales.
- Es una tecnología por desarrollar
- Complejos métodos de fabricación para los sistemas de fibra - refuerzo
- Limitada experiencia en servicio.

Los refuerzos de la matriz metálica se pueden dividir en:

- Fibras continuas: incluyen Boron, grafito, SiC, Al_2O_3, las fibras de Boron se obtienen en una reacción química (chemical vapor deposition (CVD)) de este material en un núcleo de tungsteno; estos monofilamentos oscilan entre 4.0, 5.6, y 8.0-mm de diámetro.
- Fibras discontinuas (Al_2O_3).
- Filamentos (SiC)
- Partículas
- Hilos (Tungsteno, Berilio, Titanio, Molibdeno)

Los materiales usados comúnmente como matrices son:

- Aluminio
- Fibras continuas: boron, SiC, alumina, grafito
- Fibras discontinuas: alumina, alumina-sílice
- Filamentos: SiC
- Partículas: SiC, boron C.
- Magnesio
- Fibras continuas: grafito, alumina
- Filamentos: SiC
- Partículas: SiC, boron C.
- Titanio
- Fibras continuas: SiC, boron revestido
- Partículas: titanio
- Cobre

Las óptimas propiedades mecánicas de estos compuestos, solo pueden ser aprovechadas usando la matriz y refuerzos correctos, además de la orientación de las capas para aprovechar sus grandes ventajas, especificando de esta forma los límites de rigidez y resistencia en una dirección o coeficientes de expansión.

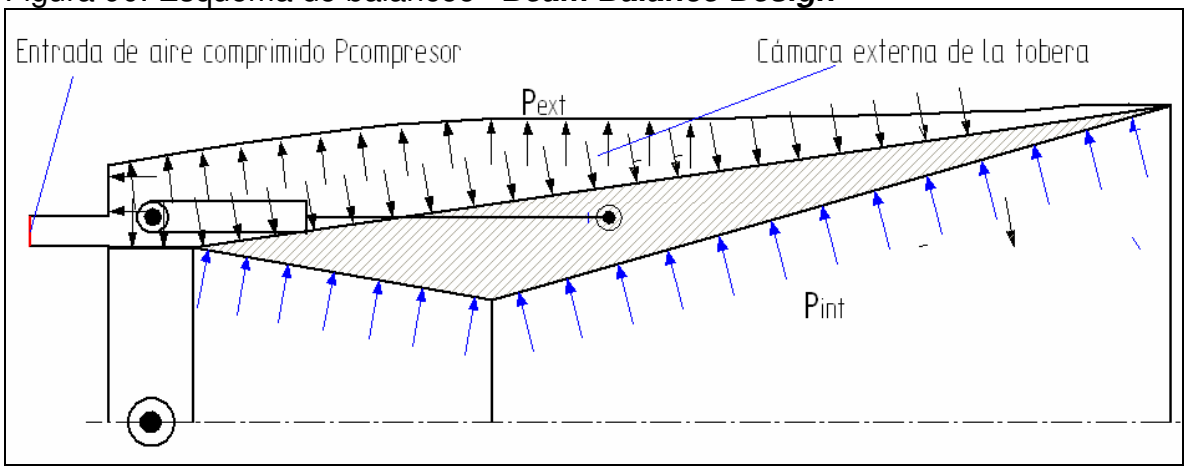
Algunas consideraciones en la selección de MMC son:

- Propiedades del refuerzo, forma y disposición de la geometría.
- Fracción de volumen del refuerzo
- Propiedades de la matriz, efectos de porosidad.
- Esfuerzos residuales, dependiendo de la historia mecánica y térmica del compuesto.

11.5 ANÁLISIS DE MÉTODO PARA BALANCEO ESTÁTICO DE LA TOBERA

Las toberas de empuje vectorial que han sido recientemente desarrolladas, cuentan con un sistema llamado ***"Beam Balance Design"***, este mecanismo trata principalmente del sangrado de aire de algunas etapas del compresor del motor, para presurizar una cámara externa a la tobera. De esta manera, se balancean las fuerzas internas y externas que son ejercidas contra las láminas convergente y divergente de la tobera, reduciendo los esfuerzos resultantes que sobre ella se producen. Un esquema de la actuación se puede observar en la figura 90.

Figura 90. Esquema de balanceo ***"Beam Balance Design"***



Diseño del autor

Esta forma de balance es muy útil, ya que genera las siguientes ventajas:

- Disminuye el peso total de la estructura.

- Reduce la cantidad de carga que es aplicada sobre los actuadores.

Teniendo en cuenta la presión con la que es sangrado el aire a presión de las últimas etapas del compresor, es posible calcular la presión con la que se estará presurizando la cámara externa. De esta manera, se puede calcular la contra - presión que estará ejerciendo el flujo contra la lámina de la tobera, lo cual creará un mejor balance estructural en la misma.

NOTA: El valor de la contra fuerza resultante por la presurización, al igual que en el análisis anterior, también se debe tomar con la magnitud como constante, la cual únicamente variará en función del ángulo de vectorización en el que se encuentre la tobera.

Idealmente el valor de volumen ocupado por la cámara debe ser el menor posible, para disminuir al máximo la cantidad de aire requerido que es sangrado del motor para presurizarla.

Para calcular esta presión se va asumir los resultados promedio obtenidos en la tabla 1, en donde se pudieron observar algunos parámetros promedio para aeronaves militares. Sin embargo es importante mencionar que estos requerimientos están limitados primeramente por el tipo de motor y de aeronave que se vaya a utilizar.

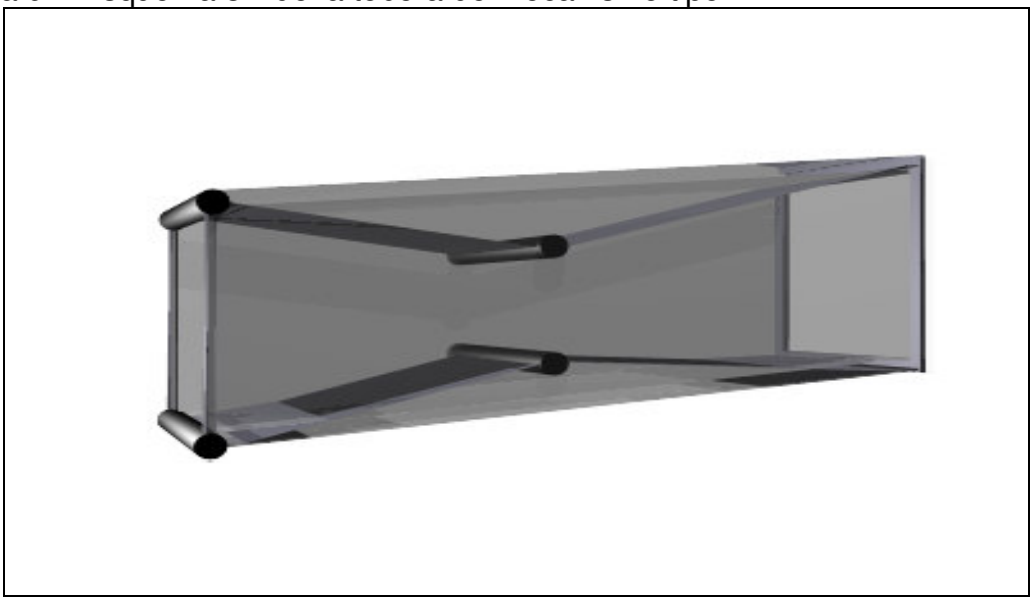
12. ANÁLISIS DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO DE LA TOBERA

Es importante detenerse en este punto con el fin de entrar a analizar las ventajas y desventajas de algunos mecanismos seleccionados para así poder definir más adelante cual seria el mecanismo más óptimo para cumpla con las necesidades que se tienen.

Después de iniciar una investigación acerca de los sistemas de actuación de mecanismos para la vectorización o movimiento de la tobera y teniendo en cuenta la explicación de los métodos generales de vectorización que se estudiarán en este proyecto, cuyo movimiento fue mostrado en el capítulo 9, se comenzó el estudio inicial con la elaboración de los esquemas generales que muestran cómo seria el movimiento de la tobera para los diferentes ángulos de vectorización, analizando los puntos de empotramiento posibles para el movimiento, la forma de hallazgo de los ángulos de construcción iniciales (geométricamente) y los grados de libertad.

NOTA: Todos los gráficos que se presentan en este capítulo, se encuentran de forma adimensional, solo cumplen la función de esquematizar para mostrar el modelo básico de movimiento.

Figura 91. Esquema 3D de la tobera de mecanismo tipo 1



Diseño del autor

Se realizó primero el boceto de la posición inicial de la tobera en condiciones supersónicas (figura 4) y partiendo de esta posición y de los ángulos y de la geometría calculadas previamente, se inició el análisis a diferentes ángulos de vectorización.

Para efectos de este análisis, el régimen subsónico no será analizado como tal en la parte del mecanismo, únicamente, el régimen más crítico o complejo (supersónico) será analizado, ya que principalmente el diseño estará enfocado a este régimen. Sin embargo, los mecanismos requeridos para cumplir con las necesidades de los 2 regímenes deben ser evaluados, según los modelos de vectorización que son planteados y recomendados en este proyecto.

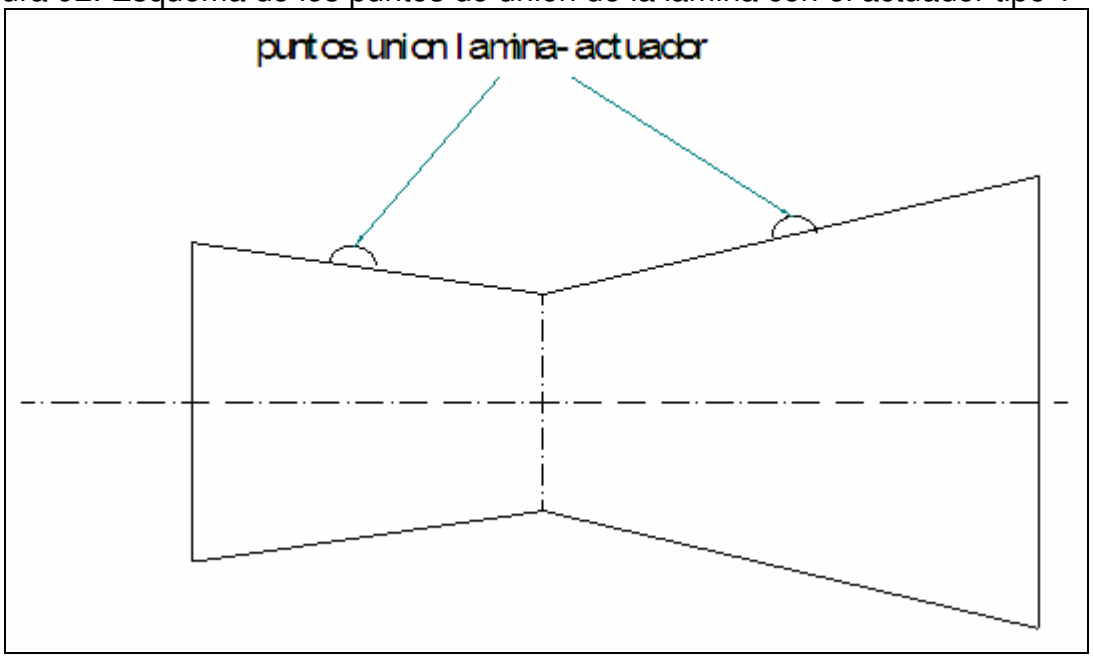
12.1 MOVIMIENTO INTERNO DE LAS SECCIONES CONVERGENTE Y DIVERGENTE (TIPO 1)

En el esquema de la figura 4 se pudieron observar geométricamente los ángulos de convergencia y divergencia de la tobera supersónica, seguidamente, ahora se tendrá que tomar o escoger los puntos donde va a pivotar, con el fin de saber que movilidad tendrá. Los puntos de pivote se muestran de gran importancia debido a que este factor nos indicará que tan independiente serán las láminas, además de que mostrarán el tipo de actuación asistida y su respectiva interfase con el sistema de actuadores que requiere para su movimiento.

Para los puntos de pivote de este caso de análisis, se tomarán las partes donde esta fija la tobera con el motor ya que en este punto no se puede mover la tobera al estar fija a la estructura del post - quemador, partiendo de esto se procede a analizar el movimiento. El punto de sujeción de la tobera será por medio de mecanismos de unión los cuales se encontrarán sujetados a la parte exterior del post - quemador.

12.1.1 Ubicación del sistema de actuación. Es necesario conocer la ubicación apropiada del sistema actuador en la tobera, para el caso de este sistema seria la ubicación de actuadores independientes por cada lamina, la ubicación en de los actuadores o mejor dicho el sistema de unión de la tobera con el actuador seria idealmente ubicada hacia la mitad de la lamina debido a que en este punto próximo a la mitad se tendría un reducción de esfuerzos de la lamina y sobre todo seria un punto que tendría una suficiente resistencia para la acción de arrastre del actuador. En esta sección no se entrara a hablar sobre el sistema de fijación del dispositivo conector que hace posible la interacción del actuador con la lámina de la tobera.

Figura 92. Esquema de los puntos de unión de la lámina con el actuador tipo 1



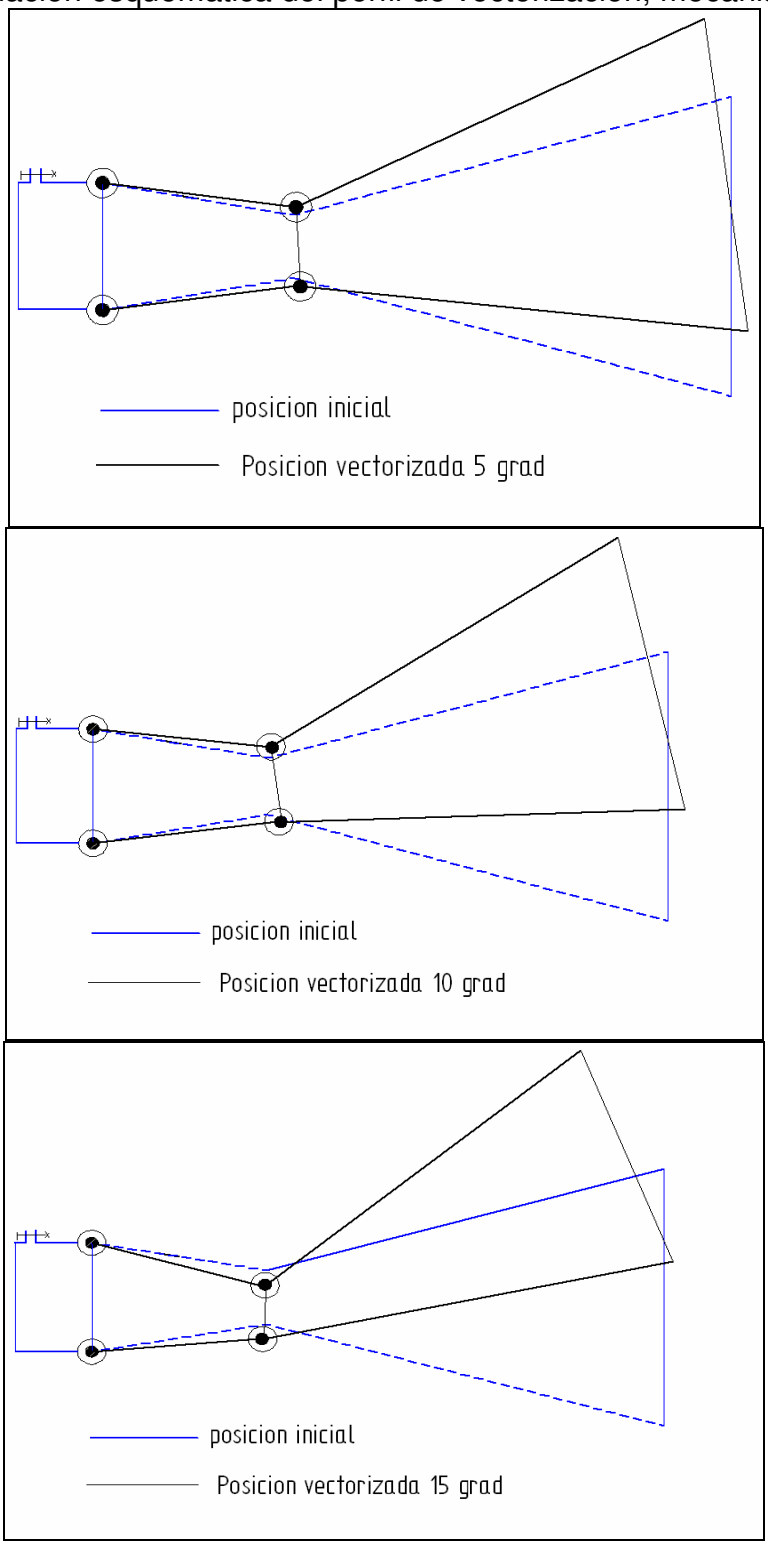
Diseño del autor

12.1.2 Análisis de vectorización. Para este caso se ha simulado el movimiento a 5^0 en donde se concluye que este sistema al estar empotrado en los puntos mostrados, presenta una restricción en el movimiento de la parte divergente si solamente se tiene un solo actuador hidráulico, el cual tendría que ser modificado o cambiado por un actuador en cada aleta de la tobera o un mecanismo de enganche al actuador que permita realizar los movimientos requeridos de las parte convergente y divergente independientemente.

Otro inconveniente de este sistema es que se puede observar en la figura 93 vectorizada a 5^0 hacia arriba, en la parte divergente se puede observar que solo se esta realizando el movimiento sin que las aletas se muevan como tal hacia arriba. Además de lo anterior, como solamente esta empotrado en un solo punto tendría que la lamina ser una sola, lo cual generaría problema de esfuerzos y tensiones en la sección de la garganta ya que esta parte se vería afectada por concentradores de esfuerzos causados por el método de vectorización de la tobera.

Cuando se desea vectorizar a diferentes ángulos se pueden observar algunas variaciones notables, ya que el cambio de ángulo es mucho mas pronunciado,

Figura 93. Variación esquemática del perfil de vectorización, mecanismo tipo 1



Diseño del autor

Además de esto, se siguen presentando problemas de actuación, ya que como se mencionaba anteriormente, tendría que existir un actuador independiente por cada aleta siendo una sola lámina para que se realicen independientemente los movimientos de cada lámina.

Se manifiesta un cambio mayor en cuanto a la vectorización, ya que se visualiza un movimiento radical de las láminas, pero como se observa el cambio de movimiento no es gradual ni tampoco simétrico debido al tipo de actuación utilizado. A parte de lo anterior, como se observó en los casos de análisis termogasodinámico, la influencia del perfilamiento de la tobera es muy importante tenerla en cuenta para realizar una vectorización adecuada, este último punto de geometría, como se pudo entender anteriormente influyó en los resultados de vectorización.

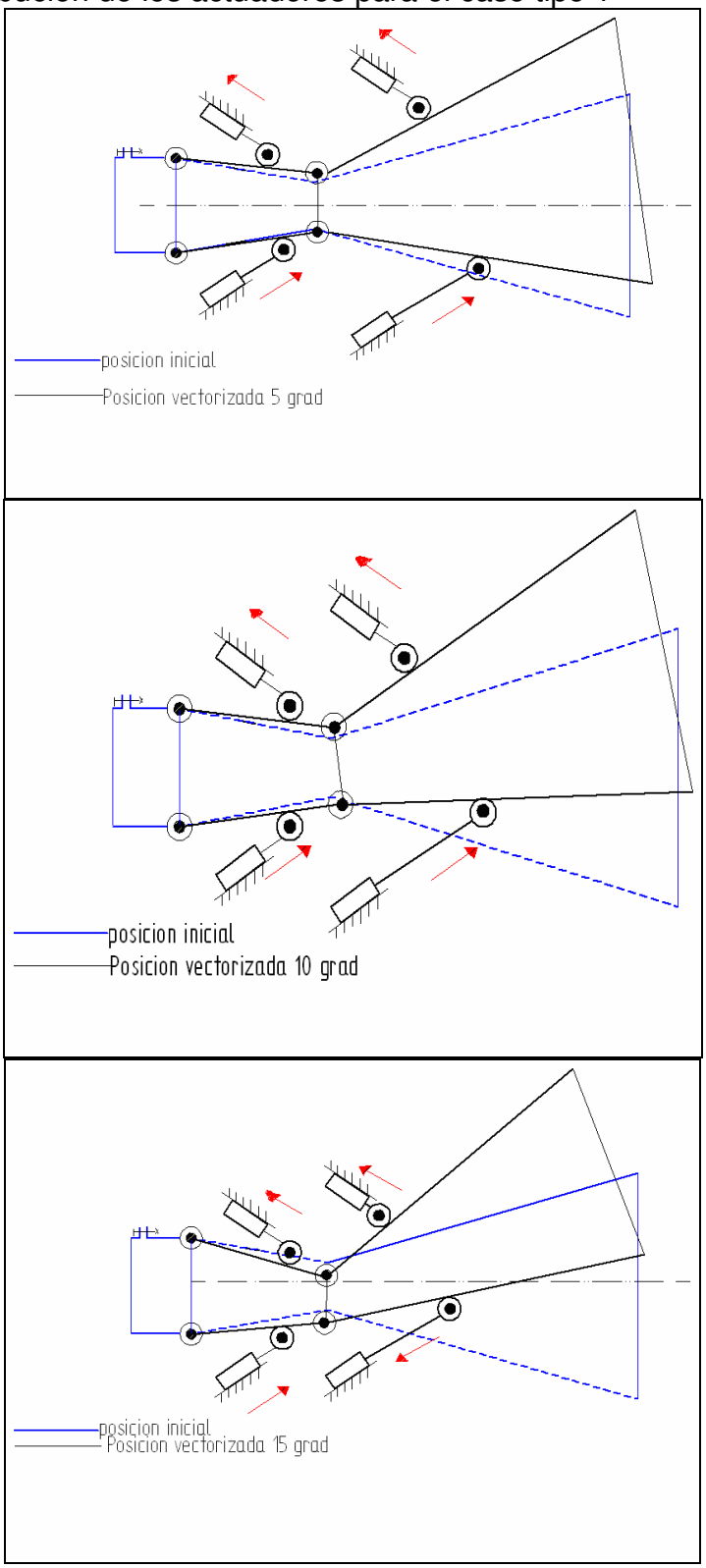
Como se puede observar con este sistema ya mencionado anteriormente, al estar vectorizado a 15^0 grados el movimiento no es muy apropiado y sincronizado produciendo muy bajo efectividad para la necesidad que se tiene sin dejar atrás los problemas de actuación mencionados anteriormente.

Podría ocurrir que cuando esté pasando el flujo por la tobera se presentara turbulencia del flujo debido al cambio brusco de movimiento del flujo por la actuación, también podría presentarse un desprendimiento de la capa limite del flujo produciéndose aun mas crítica esta situación.

Hay que detenerse a analizar los cilindros con respecto a su posición debido a que este y casi todos lo sistemas propuestos de actuación presentan un problema acerca de que como el vástago se encuentra ubicado sobre la estructura de la tobera mas no sobre las laminas de la tobera ya que si se ubica sobre la lamina se va encontrar restringido el movimiento porque el cilindro no va tener el suficiente campo para que el vástago salga y además para que este vástago genere el movimiento va estar sujeto a muchos esfuerzos debido a la posición y a la fuerza que necesita para mover la lamina.

La otra opción que se tendría es la ubicación sobre la estructura, pero esta también se encuentra restringida por el tamaño del vástago debido a que para suplir el desplazamiento de forma satisfactoria necesita una mayor distancia con el fin de que cuando de llegue al punto máximo de recorrido el vástago pueda salir sin complicación por ende la distancia de recorrido es grande y así mismo el vástago bastante largo.

Figura 94. Distribución de los actuadores para el caso tipo 1



Diseño del autor

12.1.3 Tabla de ángulos β-Θ. Ya que se conoce como se realizará la vectorización y además se conoce los puntos de anclaje de los dispositivos de actuación, sería bueno aclarar como va a ser esa interacción de estos dos factores. Simplemente el movimiento o el cambio de posición esta dado en función del recorrido o salida del vástago del actuador, esto quiere decir que a medida que el vástago salga la tobera se trata de ubicar en la posición inicial. Así mismo cuando este se retrae la tobera tiende a moverse para poder vectorizarse.

Tabla 13. Variación de los grados internos de la tobera, según el caso de vectorización tipo 1 régimen supersónico

Grados de vectorización	**5^0**	**10^0**	**15^0**
Θ	7.5^0	13.75^0	20^0
β	15^0	28^0	43^0

Diseño del autor

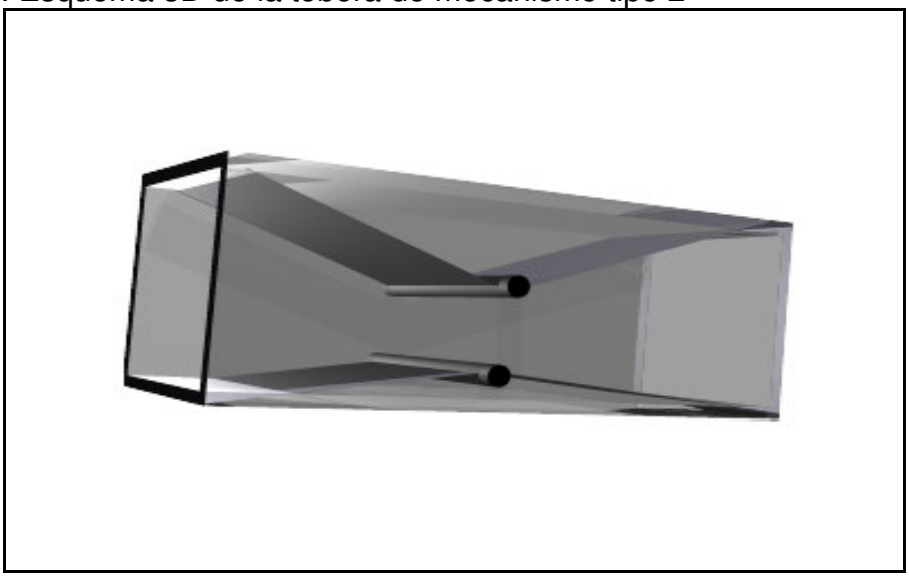
En esta sección por el momento no se han determinado aún las características de los cilindros ni las distancias de recorridos de salida del vástago, pero en la sección concerniente al estudio hidráulico se conocerá los valores aproximados. Por el momento es bueno esquematizar esta interacción movimiento-cilindro. Pero tendrá que tenerse muy en cuenta las características mencionadas anteriormente acerca de los problemas del cilindro con respecto a su ubicación.

12.1.4 Interacción entre el mecanismo de la tobera y el sistema de actuación. Como se puede observar con este sistema ya mencionado anteriormente, al estar vectorizada la tobera a 15^0 grados el movimiento realizado no es muy apropiado y sincronizado produciendo muy baja efectividad para la necesidad que se tienen, además se tendrán problemas adicionales para el posicionamiento y calibración de los sistemas de actuación.

12.2 MOVIMIENTO ÚNICO DE LA SECCIÓN DIVERGENTE (TIPO 2)

En este sistema se ha cambiado el punto de pivote, ya no estará ubicado en la parte de la unión de la tobera con el post - quemador sino que estará ubicado sobre las secciones superior e inferior de la garganta, esto quiere decir que la parte convergente conservara su geometría constante durante los diferentes ángulos de vectorización, esto indica que permanecerá estática durante todo el proceso.

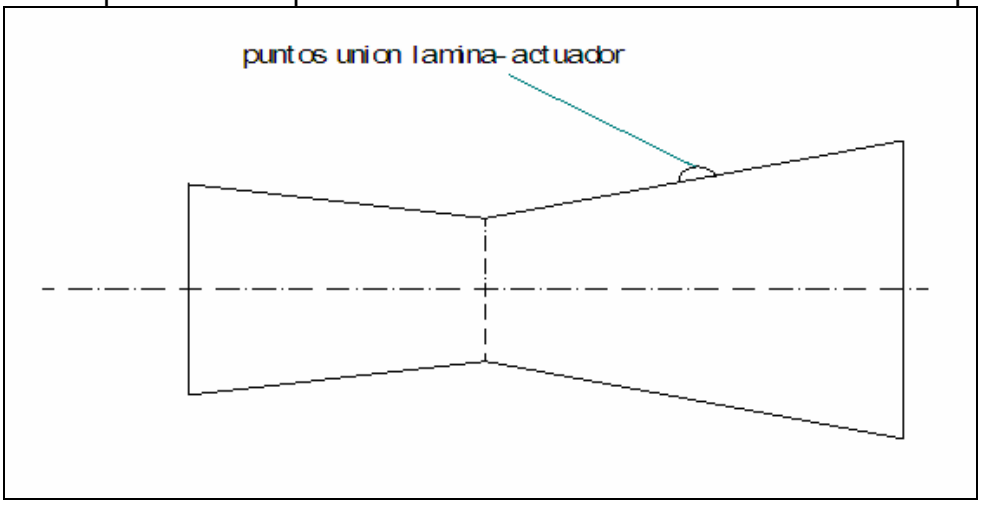
Figura 95. Esquema 3D de la tobera de mecanismo tipo 2



Diseño del autor

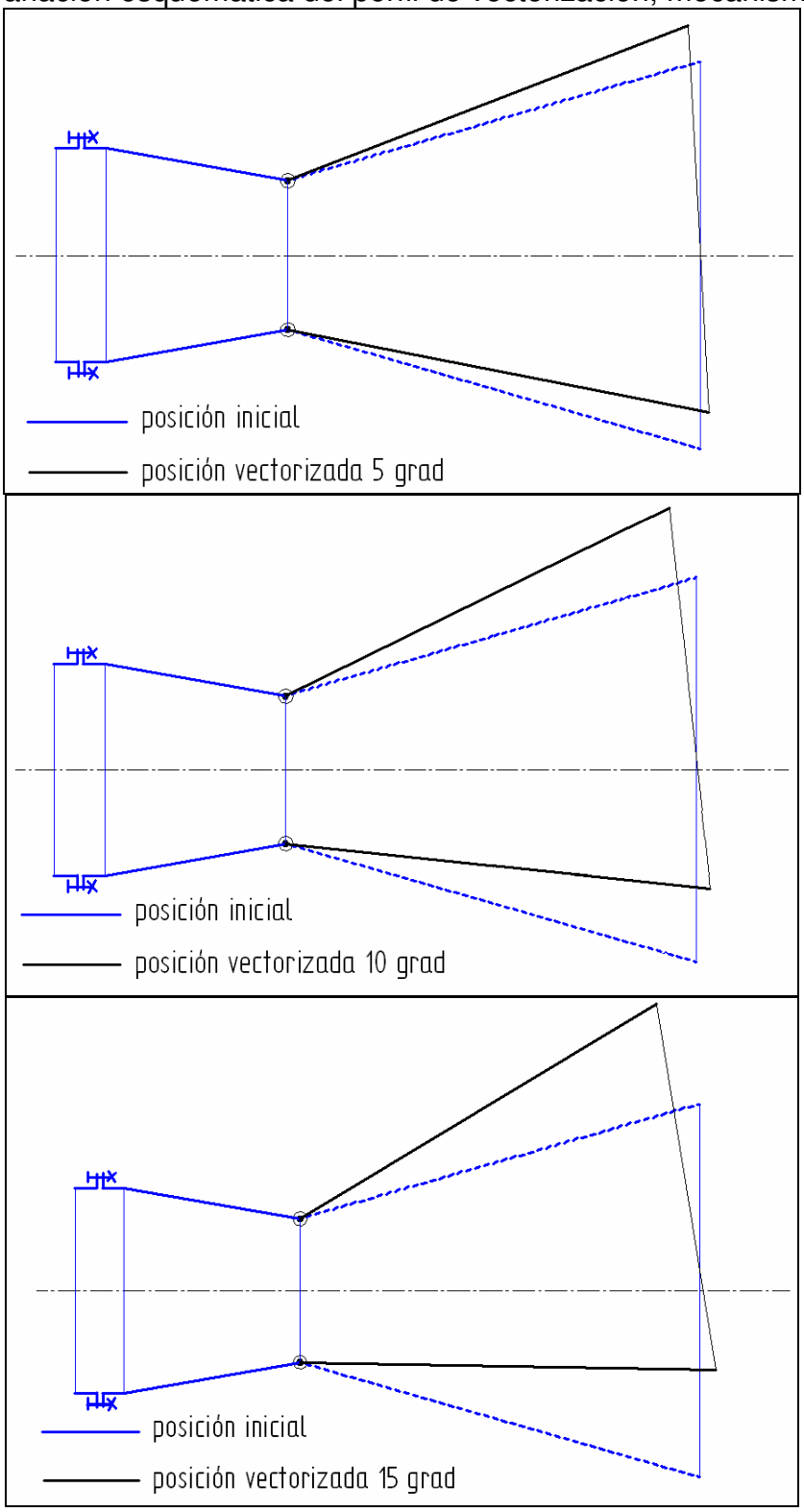
12.2.1 Ubicación del sistema de actuación. Con respecto a la ubicación del sistema de actuación para este tipo de mecanismo se simplifica aún mas, ya que como el sistema solo va estar fijo en el motor y tiene un pivote para movimiento en la zona de la garganta, por ende solo se tendrá la ubicación en la sección media de la lamina de la parte divergente del dispositivo de salida en donde se realizará la unión del actuador con la superficie de la lámina, en el momento no se especificará el tipo y cantidad de actuadores, ya que estos dependen del análisis estructural y de actuación sobre los cuales se tratará mas adelante.

Figura 96. Esquema de los puntos de unión de la lámina con el actuador tipo 2



Diseño del autor

Figura 97. Variación esquemática del perfil de vectorización, mecanismo tipo 2



Diseño del autor

Como se puede observar en cuanto a este sistema, es el que cumple más fácilmente la función de generar un ángulo de vectorización del flujo mucho más eficaz que el sistema anterior, pero entraría a jugar un factor de estudio importante en donde evaluáramos que tan bueno será para el flujo ese cambio de dirección, por ende se tendría que revisar si existen pérdidas considerables de flujo.

12.2.2 Análisis de vectorización. Este sistema es un poco más práctico ya que solo se estarán moviendo las aletas de la sección divergente, permitiendo que se reduzca el sistema de actuadores. Este sistema es mas eficiente que el anterior ya que este no posee el mecanismo de doble rótula como en el tipo anterior, permitiéndole ser independiente el movimiento de las aletas, mientras que con el sistema de la rotula (tipo 1) no puede ser independientes el movimiento de las aletas en la sección divergente, ya que depende del movimiento de las aletas en la parte del empotre o la sección convergente.

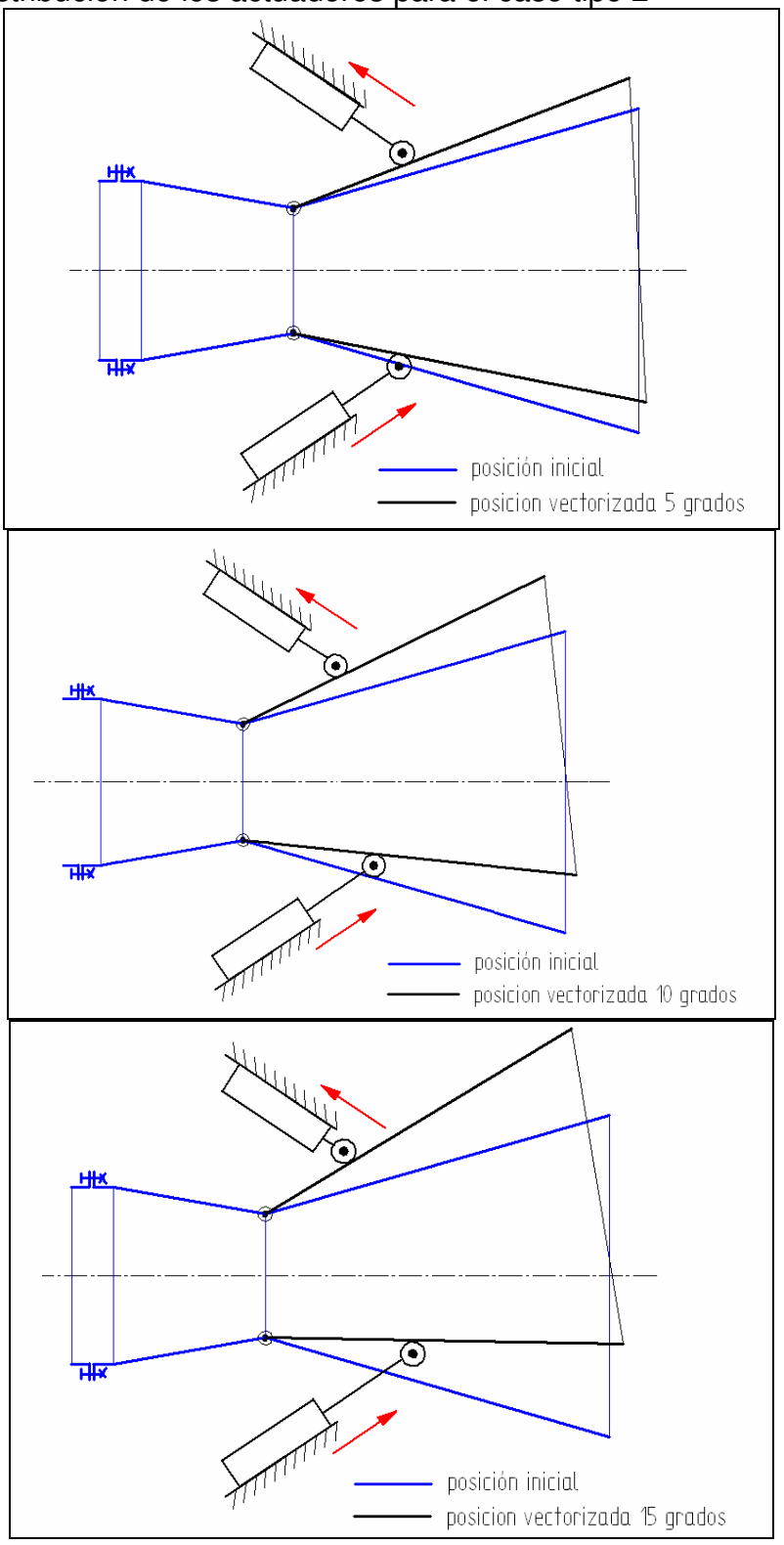
Para la variación de ángulo 10 grados la metodología aplica igualmente, según el tipo de unión que se tenga del mecanismo al actuador. En la figura 97 se muestra el esquema de vectorización de la tobera para este caso tipo 2.

Como se observa el movimiento es mucho mas eficiente a ángulos de vectorización pronunciados permitiendo suplir la necesidad de un movimiento eficaz a un bajo porcentaje de perdidas de propiedades del flujo, como este de 15 grados en donde, se ve mas suavizado el conducto de paso.

El problema que presenta este sistema es que, para que pueda realizar el movimiento tiene que ser independiente de la sección convergente. Al tener está independencia debe tener un sistema de unión que provea una característica importante de diseño que permita el movimiento independiente, y que además, en la parte de la unión permita que exista una hermeticidad con el fin de evitar ó disminuir pérdidas. Es así, que el problema se encontrará principalmente en el diseño del sistema de unión, ya que es bastante complicado para la etapa de construcción y de ensamblado del mecanismo de la tobera.

12.2.3 Tabla de ángulos β-Θ. Los ángulos en este caso cambian únicamente para la parte divergente, como se muestra en la tabla 14. Para el efecto propuesto de movimiento existe una variación del área de salida por efecto del cambio en la posición de las láminas de la parte divergente, lo cual para este caso de diseño inicial no será tenido en cuenta. Al variar la posición angularmente de las láminas, la longitud de salida varía también, ya que los puntos de pivote se encuentran en

Figura 98. Distribución de los actuadores para el caso tipo 2



Diseño del autor

diferentes lugares, superior e inferior, para la parte superior y la parte inferior de la tobera respectivamente.

Tabla 14. Variación de los grados internos de la tobera, según el caso de vectorización tipo 2 régimen supersónico

Grados de vectorización	**5^0**	**10^0**	**15^0**
Ɵ	10^0	10^0	10^0
β	21^0	26^0	31^0

Diseño del autor

12.2.4 Interacción entre el mecanismo de la tobera y el sistema de actuación. En la figura 98 se muestra el posicionamiento esquemático de los diferentes actuadores que van a actuar sobre las láminas del conducto divergente, con el fin de efectuar el proceso de vectorización requerido. Para este caso, en una primera aproximación el posicionamiento de los cilindros se localiza en una posición cercana a la sección divergente de la tobera, con el fin de reducir la distancia entre el objeto de control y el elemento controlador.

12.3 MOVIMIENTO TOTAL EXTERNO DE LA TOBERA (TIPO 3)

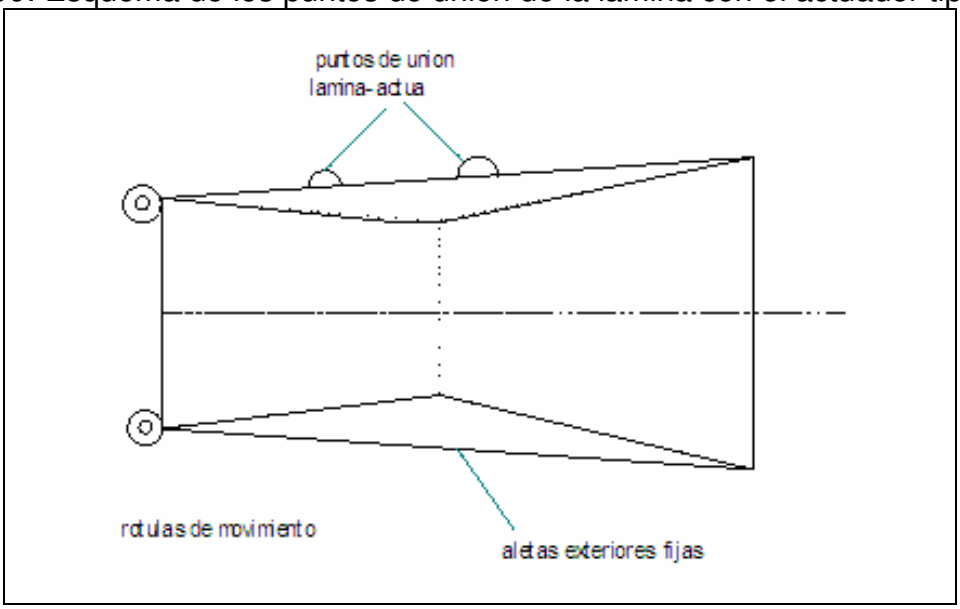
Pensando en otras posibilidades se han mirado otros tipos de mecanismo donde la actuación es completa esto quiere decir que ya no se va mover interiormente sino que se va a realizar un movimiento que permita la movilidad completa de la tobera, sin que se modifique la geometría interna de la misma.

12.3.1 Ubicación del sistema de actuación. La ubicación del sistema de actuación se encuentra ubicada sobre la lámina exterior del sistema, los puntos de anclaje con el sistema de actuación se encuentran ubicados y distribuidos hacia el centro de la lámina y de esta forma se distribuirán cercanos hacia la sección media de la lámina.

12.3.2 Análisis de vectorización. Este tipo de sistema de vectorización, presenta el movimiento de la tobera de forma externa, esto quiere decir que la tobera se no va a tener ningún tipo de cambio interno, esto quiere decir que el sistema no actuara de forma directa en las laminas móviles o aletas sino que se encontrara conectado a la parte externa permitiendo que las características geométricas de la tobera sean constantes. Este sistema presenta ventajas en cuanto a que va tener una reducción en la cantidad de elementos que conforman el grupo actuador por

ende se obtiene una reducción de peso, otra ventaja que presenta es que solo tendrá los puntos de pivote en la zona de unión entre el post quemador y la entrada de la tobera permitiendo así que el movimiento no dependa de otro movimiento como se presentaba anteriormente en el caso tipo 1 donde un movimiento de una aleta dependía de la otra mientras que en este caso se emite ese problema debido a la actuación externa llegando así a tener un sistema de actuación totalmente independiente.

Figura 99. Esquema de los puntos de unión de la lámina con el actuador tipo 3



Diseño del autor

Por ende es un sistema que presenta varias ventajas que lo hace un sistema de bastante rendimiento desde el punto de vista de actuación

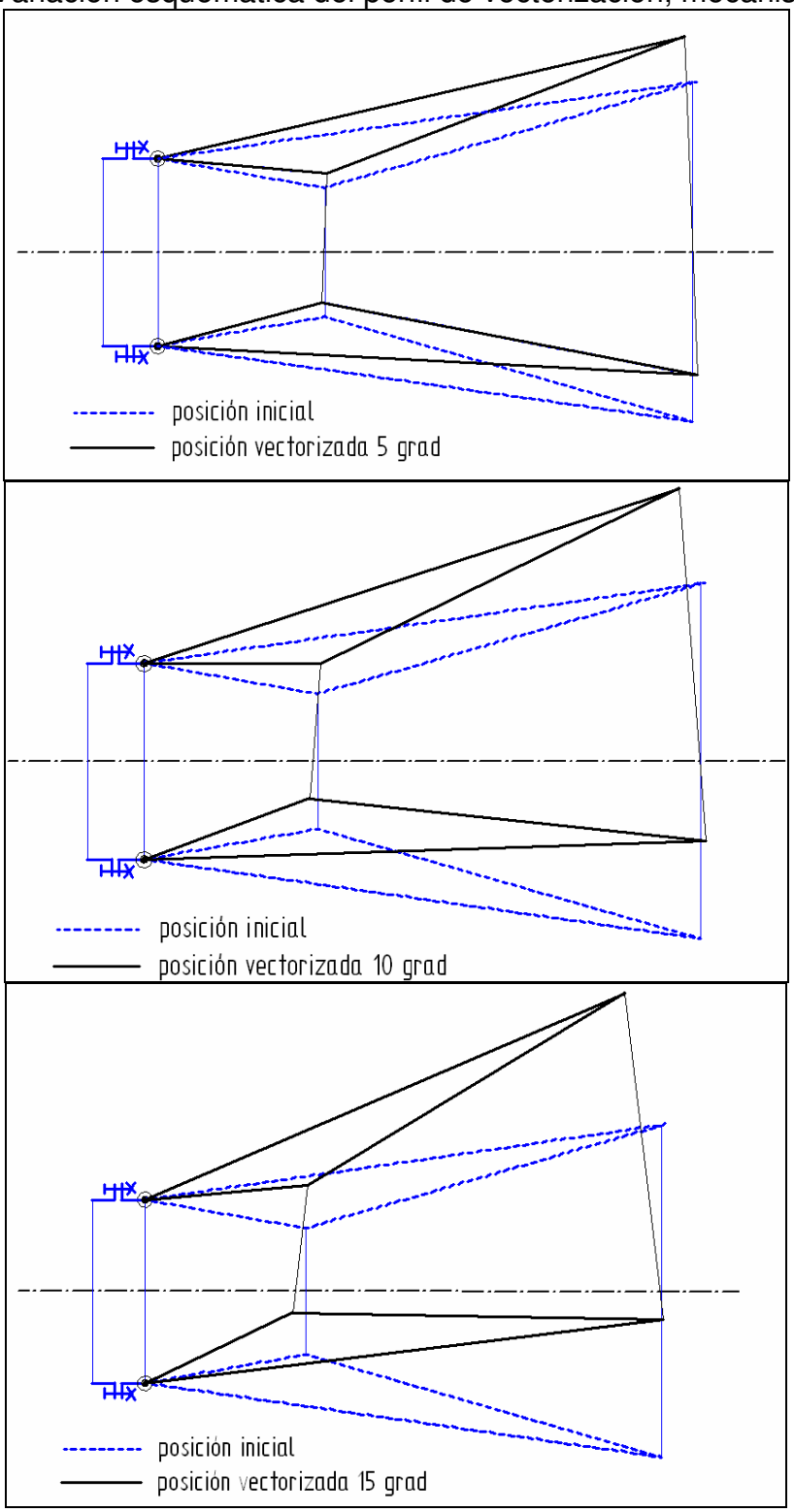
12.3.3 Tabla de ángulos β-Ɵ. Para este caso los diferentes resultados para cada ángulo de vectorización se pueden observar en la tabla 15.

Tabla 15. Variación de los grados internos de la tobera, según el caso de vectorización tipo 2 régimen supersónico

Grados de vectorización	**5^0**	**10^0**	**15^0**
Ɵ	10^0	10^0	10^0

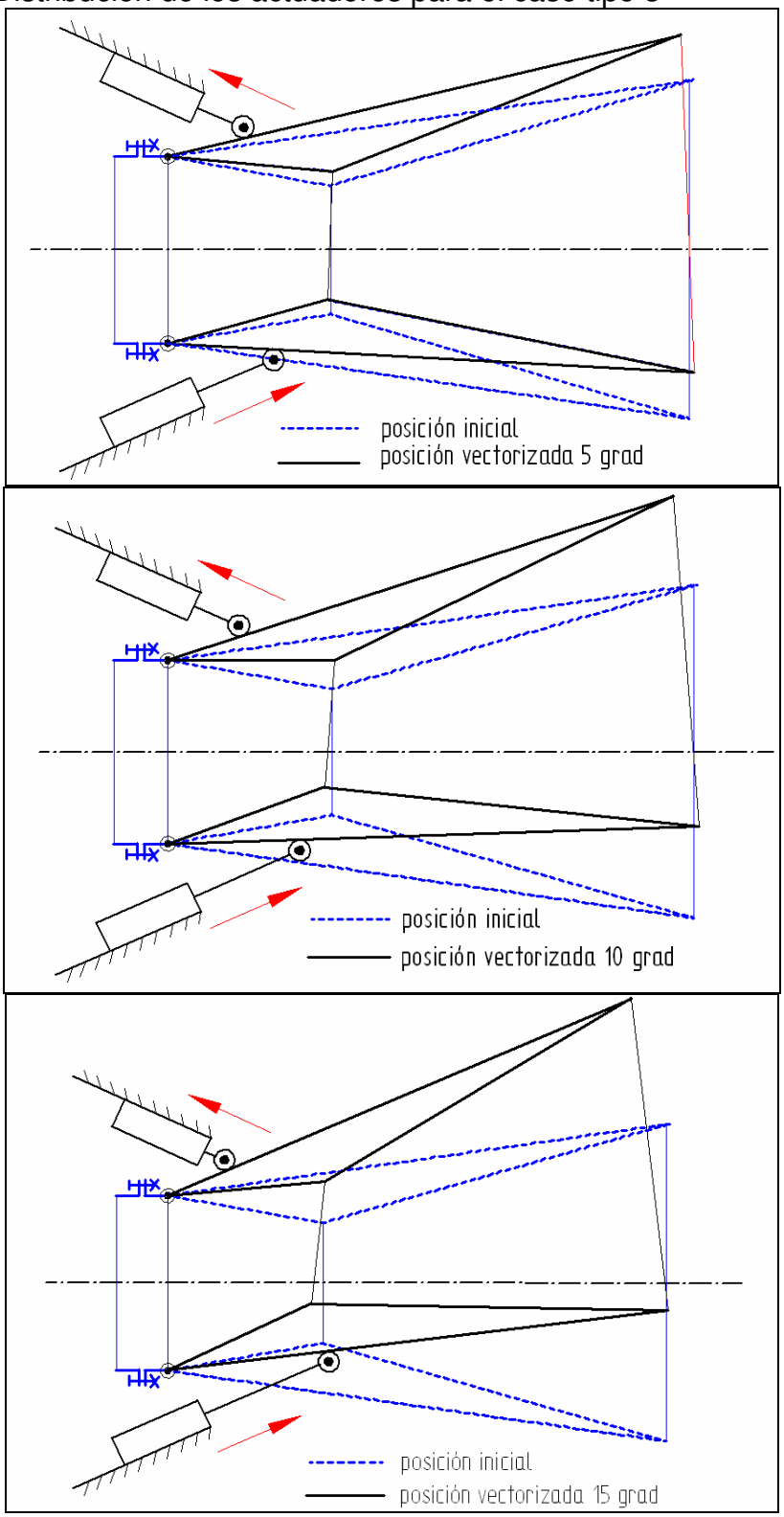
Diseño del autor

Figura 100. Variación esquemática del perfil de vectorización, mecanismo tipo 3



Diseño del autor

Figura 101. Distribución de los actuadores para el caso tipo 3



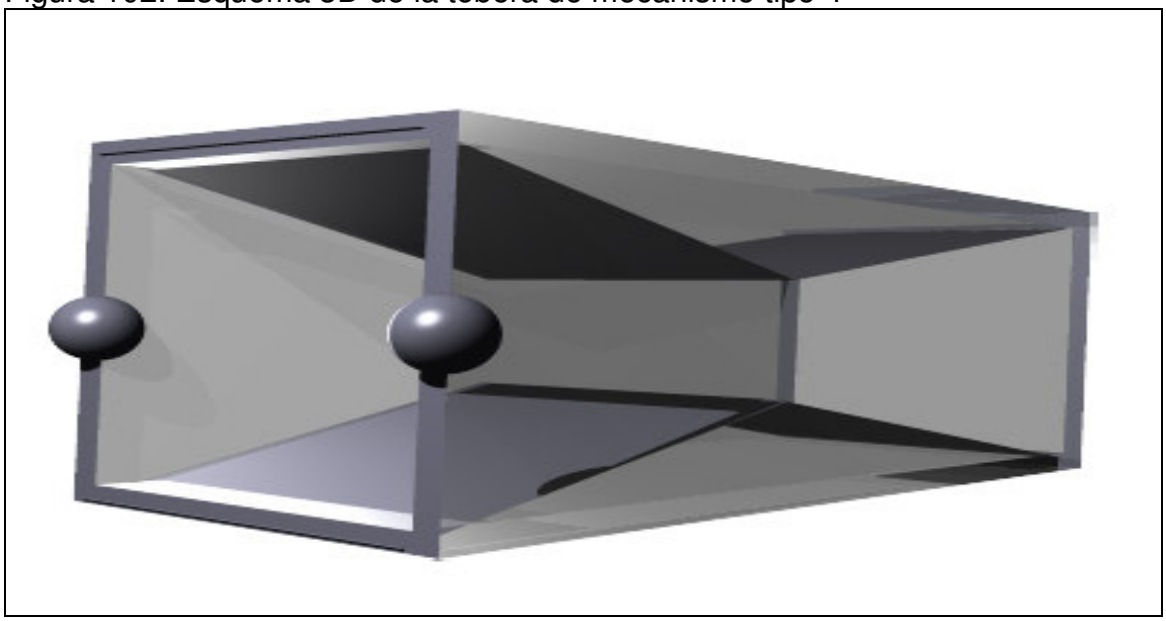
Diseño del autor

12.3.4 Interacción entre el mecanismo de la tobera y el sistema de actuación. El posicionamiento y ubicación respectivos de los actuadores se pueden ubicar en la figura 101.

12.4 MOVIMIENTO TOTAL EXTERNO DE LA TOBERA DE CAJÓN PIVOTADO EN EL MEDIO (TIPO 4)

Este sistema presenta, un concepto totalmente diferente a los anteriores sistemas, el cual lo hace un poco independiente a muchos factores internos del motor.

Figura 102. Esquema 3D de la tobera de mecanismo tipo 4

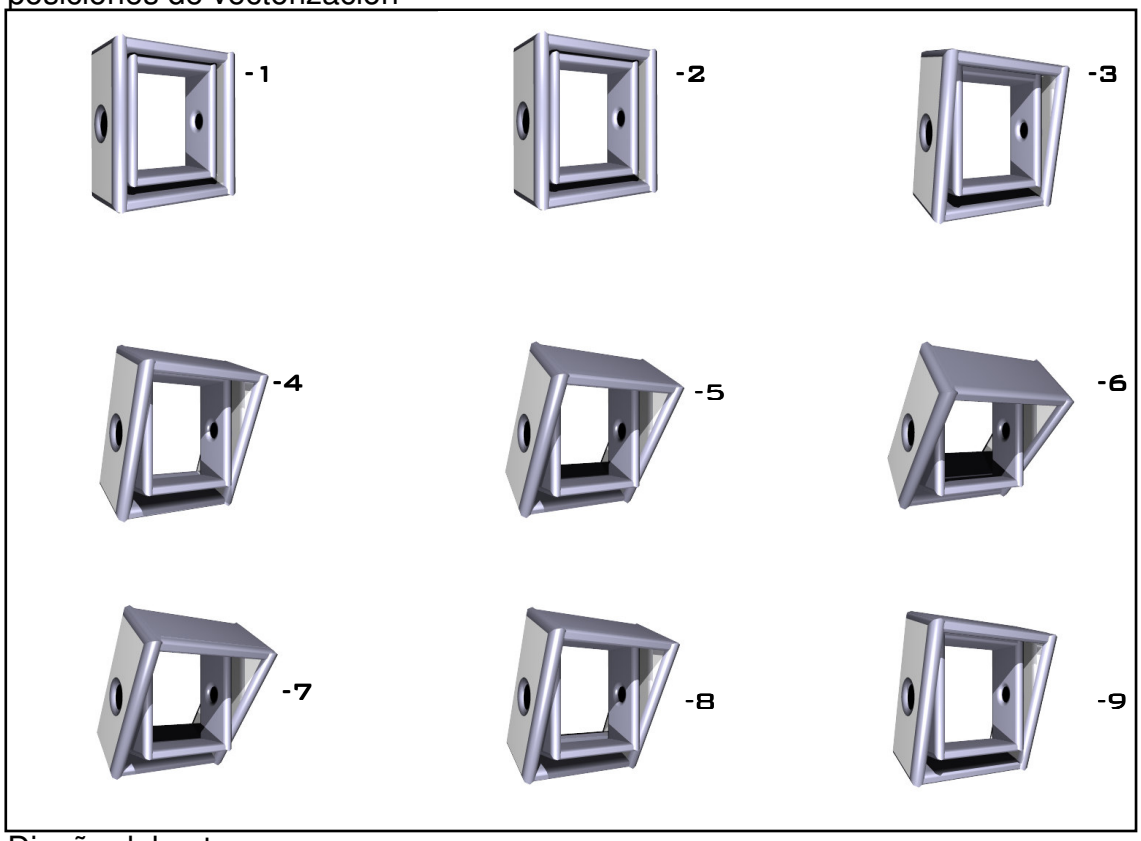


Diseño del autor

Como se puede observar en este sistema, es de tipo de movimiento completo sin necesidad de efectuar cambios internamente, dicho de otra manera, sin que las aletas se muevan, sino por medio de un sistema actuador hidráulico o mecánico se mueva desde atrás produciendo un movimiento total de toda la tobera.

Nota: En el esquema de la figura 103 se presenta la cajas de unas longitudes pequeñas, las cuales e hicieron así solo con el fin de mostrar la forma en conjunto, pero no quiere decir que realmente fueran estas longitudes, para el caso real la caja exterior llevaría las medidas reales con respecto a la longitud.

Figura 103. Esquema 3D de la tobera de mecanismo tipo 4 para diferentes posiciones de vectorización

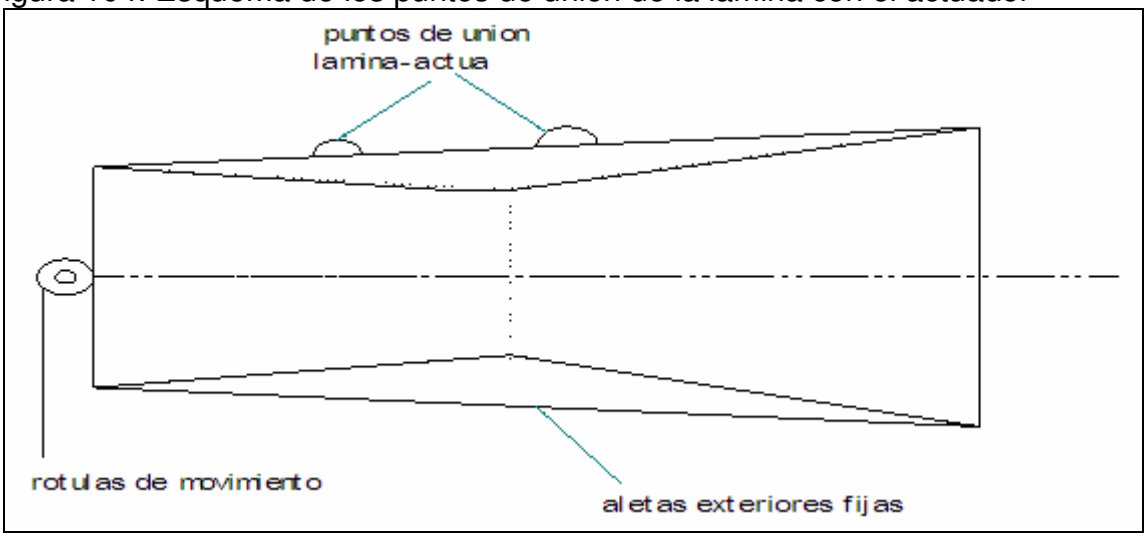


Diseño del autor

12.4.1 Ubicación del sistema de actuación. Este esquema tendría una buena viabilidad, ya que facilitaría la utilización de actuadores, las desventajas que podría presentar seria el tamaño ya que tendrá que ser bastante mayor área y por ende necesitaría un mayor espacio, cuestión que es de gran importancia para la ubicación.

Como se puede observar en el dibujo de la figura 104, se tiene un sistema de actuación en donde la tobera esta cubierta por una especie de caja o una serie de laminas de la rodean con el fin de que a estas laminas se conecten los dispositivos de unión, para pode producir el moviendo de la tobera pero de forma externa de tal modo que el movimiento de la tobera sea completo y no seccionado por las aletas internas. Con respecto a las rotulas de movimiento, están conectadas a tanto a las aletas interiores como a las exteriores por medio de las pistas internas de las rotulas, además de esto las rotulas están conectadas a la sección del motor para que el movimiento se pueda realizar de forma externa y total de la tobera.

Figura 104. Esquema de los puntos de unión de la lámina con el actuador



Diseño del autor

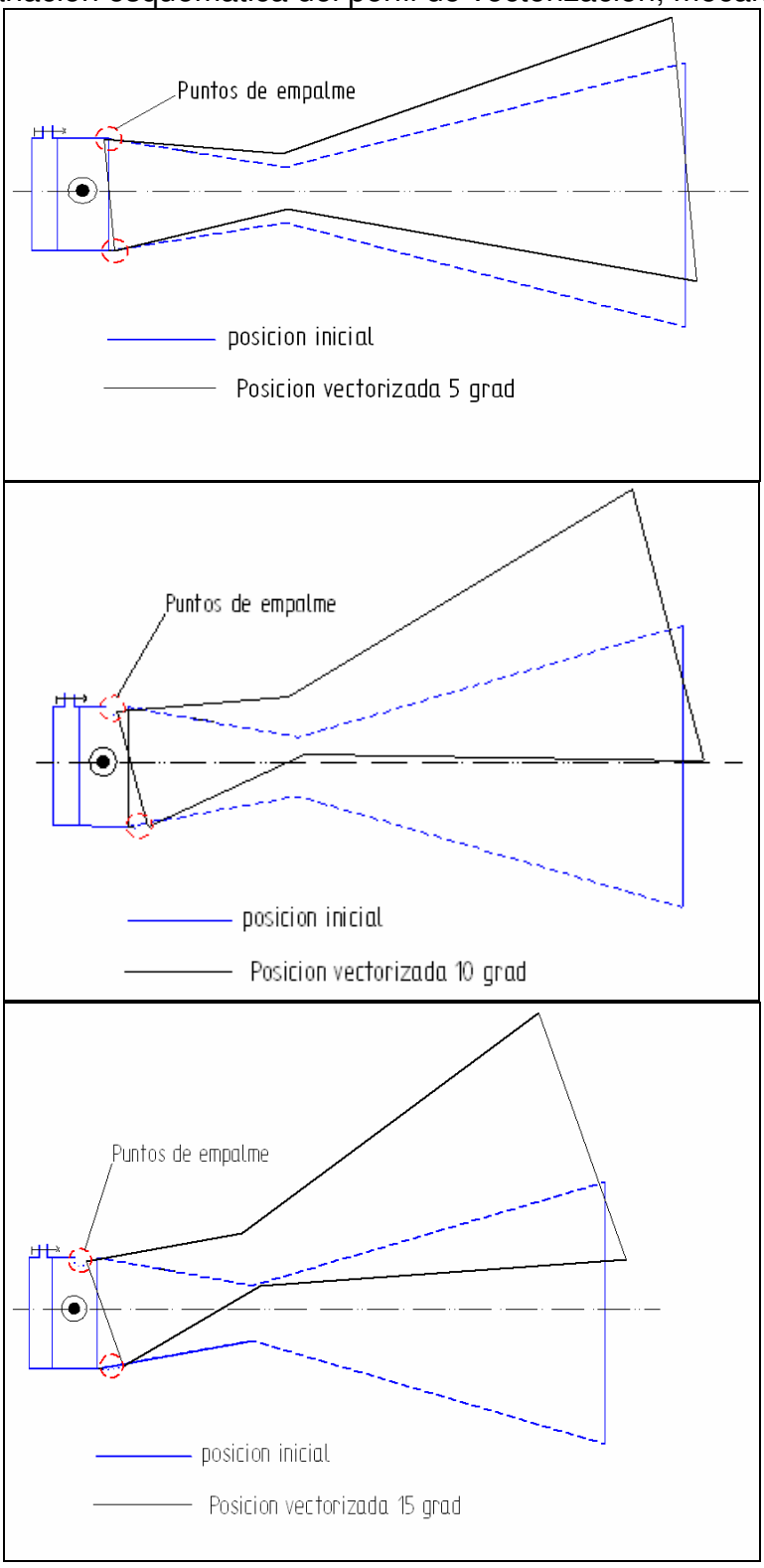
12.4.2 Análisis de vectorización. En el esquema de la figura 105 presenta la cajas de unas longitudes pequeñas, las cuales e hicieron así solo con el fin de mostrar la forma en conjunto, pero no quiere decir que realmente fueran estas longitudes, para el caso real la caja exterior llevaría las medidas reales con respecto a la longitud.

Este sistema es de tipo cajón o caja**,** el cual esta compuesta por una sección interior que en este caso seria una tobera con las características internas como los esquemas anteriores, esto quiere decir que la configuración de las aletas sigue siendo igual convergente-divergente, sino que además tiene una sección externa la cual se va a mover pivotando con respecto a la caja interior y de unos pines que los unen internamente, permitiendo la desviación o el direccionamiento del flujo hacia arriba o hacia abajo.

El desarrollo de este tipo de mecanismo sería posible si se tiene un material que cumpla una serie de funciones estructurales.

- El material debe poder encogerse y estirarse en alguna medida sin sobrepasar el límite plástico del mismo, esto quiere decir, sin que se deforme por las cargas a las que va estar sometida como cargas mecánicas y las cargas térmicas las cuales van a ser determinantes.

Figura 105. Variación esquemática del perfil de vectorización, mecanismo tipo 4



Diseño del autor

- Debe poder realizar la unión de la tobera con el post – quemador.

- La lámina debe garantizar rigidez con el fin de brindar estabilidad a la tobera con el fin de que no tenga oscilaciones en el movimiento.

A pesar de que el sistema pueda ser viable, se genera un grado de dificultad bastante alto debido a que las especificaciones del material son muy exigentes y por ende se hace compleja la búsqueda comercial o el diseño de un material que cumpla con estos requerimientos.

Por ello seria bueno analizar el sistema con otro tipo de actuación o con otros dispositivos de movilidad como los pueden ser las rotulas de unión u otros mecanismos de actuación

12.4.3 Tabla de ángulos β-Θ. Visualizando las gráficos de las vectorizaciones anteriores, se puede observar que la vectorización del flujo es óptima debido que la resultante del flujo da como resultado un ángulo de vectorización bastante propicio para cada grado, en otras palabras esta cumpliendo con la finalidad de cambiarle la dirección al flujo en sus diferentes ángulos, con el mecanismo más sencillo posible para hacerlo. Esto quiere decir que es un sistema que puede tener muy buena viabilidad para el objetivo que se quiere en este estudio.

Tabla 16. Variación de los grados internos de la tobera, según el caso de vectorización tipo 4 régimen supersónico

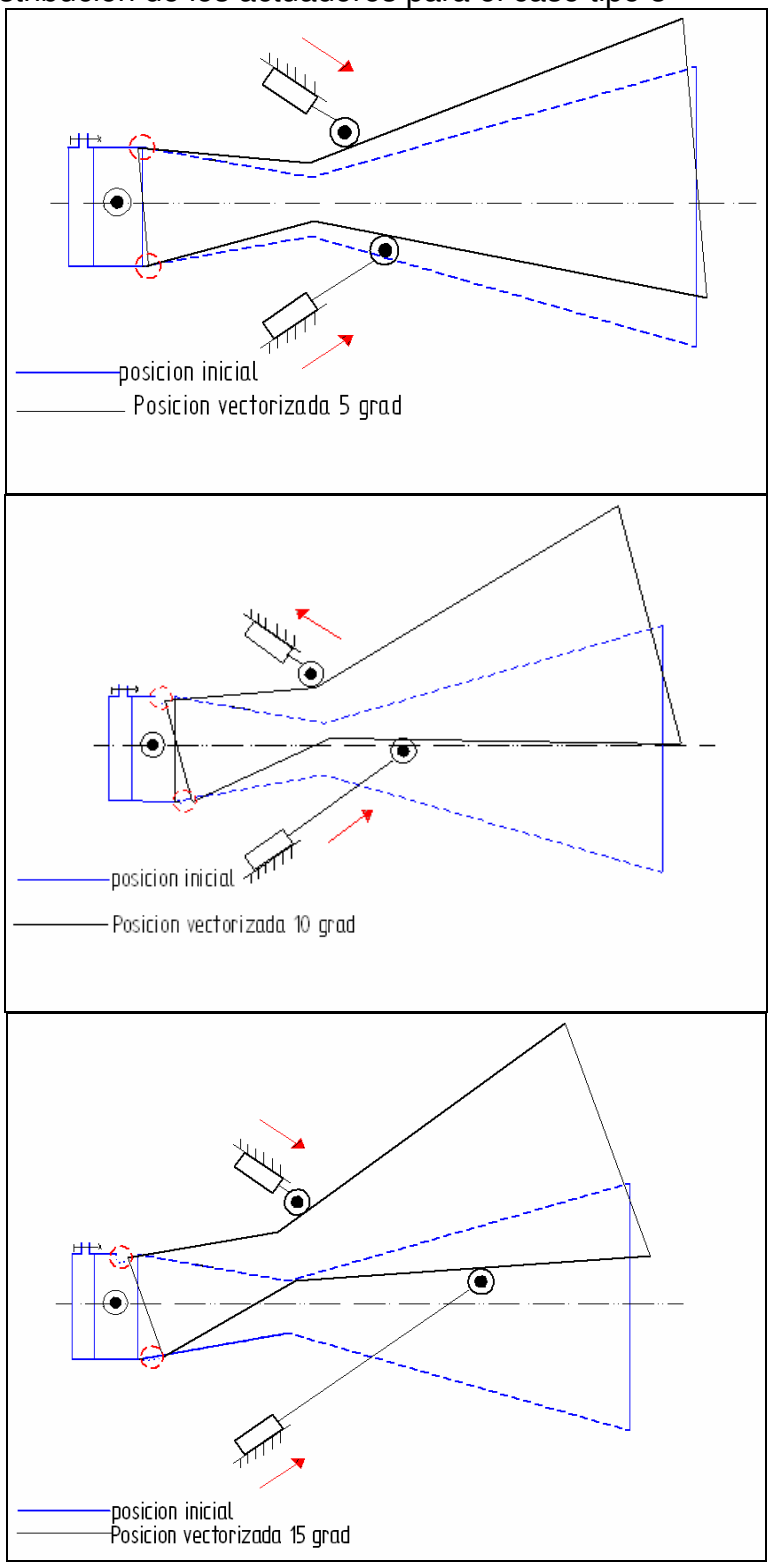
Grados de vectorización	**5^0**	**10^0**	**15^0**
Variación longitudinal angular	5^0	10^0	15^0

Diseño de autor

12.4.4 Interacción entre el mecanismo de la tobera y el sistema de actuación. El posicionamiento general de los cilindros se puede esquematizar según el esquema de la figura 106.

Para este caso sería recomendable ubicar el punto de pivote cercano a los límites del centro resultante de fueras. Además se debe analizar muy bien el posicionamiento del cilindro para garantizar el ahorro de espacio y la eficiencia del sistema.

Figura 106. Distribución de los actuadores para el caso tipo 3



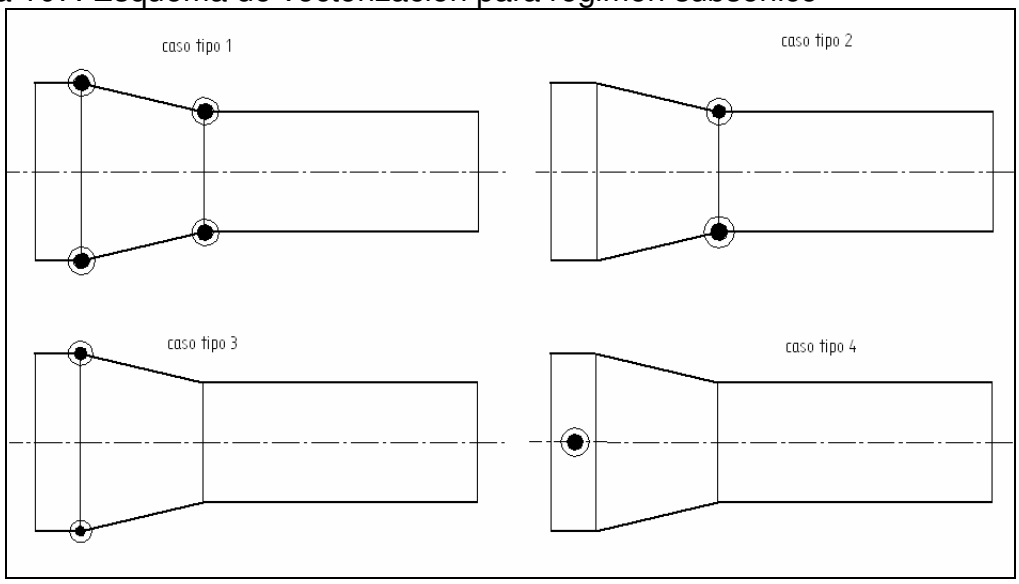
Diseño del autor

12.5 VECTORIZACIÓN DEL SISTEMA RÉGIMEN SUBSÓNICO

Anteriormente los esquemas tratados sobre vectorización hacen relación al régimen supersónico, ya que es en este régimen en donde se debe enfocar el diseño para obtener la mayor efectividad el mecanismo actuador posible, y por ende, el sistema de la tobera, además de esto, es en este régimen en donde se localizarán los más altos valores de esfuerzo y de fuerzas para el movimiento respectivo.

Sin embargo, no se puede dejar atrás el planteamiento del análisis el posicionamiento y mecanismo respectivo en que se encontrará la tobera cuando se este tratando el régimen subsónico, este sin embargo, tras un estudio más avanzado debe satisfacer ambos regimenes según las necesidades que se tengan.

Figura 107. Esquema de vectorización para régimen subsónico



Diseño del autor

12.6 ANÁLISIS DEL MECANISMO CON DISPOSITIVO TIPO CAM

Se entiende por cam la curvatura que posee la lámina de la tobera, la cual tiene como finalidad permitir una mejor movilidad de la tobera a la hora de la actuación. Este cam funciona por medio del paso de un actuador con cabeza de rodillo sobre las guías del cam, al pasar el actuador sobre esas guías con curvatura, se ejerce

una fuerza sobre la superficie permitiendo el movimiento de la tobera en la sección convergente.

Hasta el momento el cam solo se ha estudiado para la parte convergente debido a que para la parte divergente de la tobera tiene un sistema más complicado, ya que no se ha logrado la sincronización de ambos sistemas, pero se ha pensado en la utilización de actuadores para esta zona o de otra adecuación de una curvatura de la lámina para la sección divergente. A continuación se encontrará el modelado del cam para la parte divergente con las indicaciones de la curvatura, salidas máximas y mínimas del actuador, y además las posibles variantes de la adecuación de los actuadores.

12.6.1 Determinación de la curvatura. Para determinar la curvatura de la lámina se debe tener en cuenta varios factores como lo son:

1. Características de la lámina.

2. Carrera del actuador.

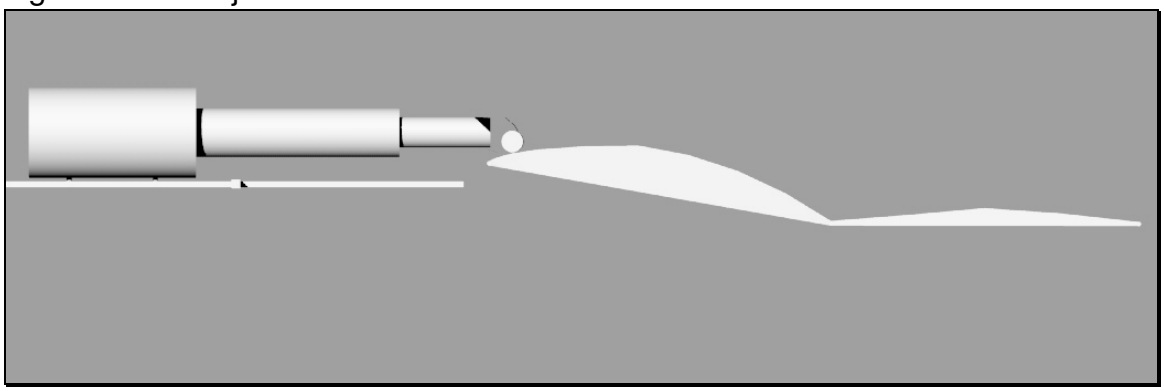
3. Tamaño del dispositivo deslizador.

Con respecto a las características de la lámina, es determinante ya que esta define las condiciones de resistencia del material, con el fin de poder determinar el material que por el momento pueda resistir el maquinado para la curvatura. La carrera del actuador es influyente ya que define la inclinación de la curva y el punto mas alto de la curva (cima), al conocer el punto mas alto de la curvatura se conocería la restricción de la carrera del actuador , debido a que si sigue saliendo patinaría ya que no encuentra superficie donde hacer contacto. El tamaño del dispositivo deslizador o roller define las guías de paso por la lámina.

Ya teniendo definido las características de diseño del cam, hay que entrar analizar la parte de cómo de va a desarrollar el movimiento de la tobera con respecto al movimiento del actuador.

Como se puede ver en la figura 108 el conjunto de actuación, esta determinado por los elementos mencionados anteriormente que son: el actuador, el roller y la superficie (lámina con su respectivo cam).

Figura 108. Conjunto de actuación



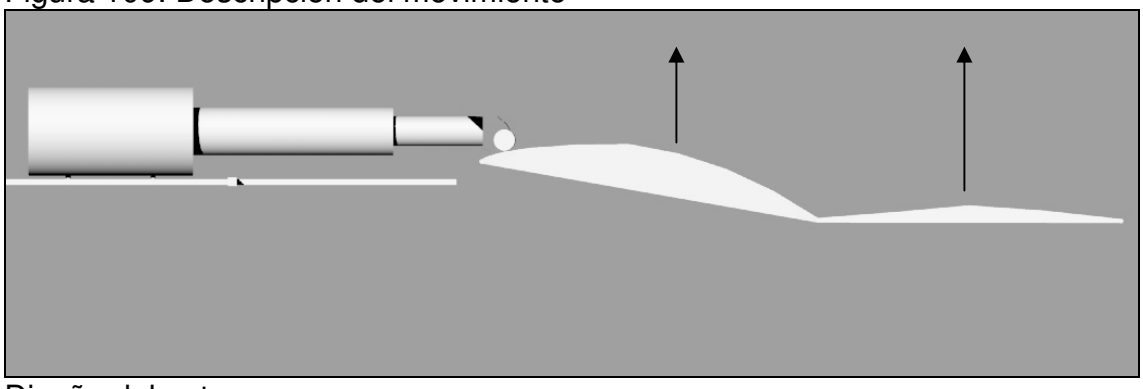
Diseño del autor

La misma figura determina cuando el actuador esta totalmente recogido, la forma que toma la tobera tiene en condiciones de máximo régimen de vectorización subsónica, en donde se obtiene que la parte convergente está con la inclinación mayor y la parte divergente mantiene una posición recta.

A medida que el actuador va saliendo y va haciendo su recorrido por el cam la tobera tiende a tomar la posición en que la parte convergente sube y la parte divergente también sube con los grados de inclinación respectivos (10^o convergente- 16^0 divergente) como se muestra en la figura 109.

Al parecer la presión que debería ejercer el actuador sobre la superficie tendría que ser bastante grande, pero no es así. Ya que por la magnitud axial que lleva el flujo, este mismo ayudara a producir un momento para poder realizar el movimiento de subir las secciones.

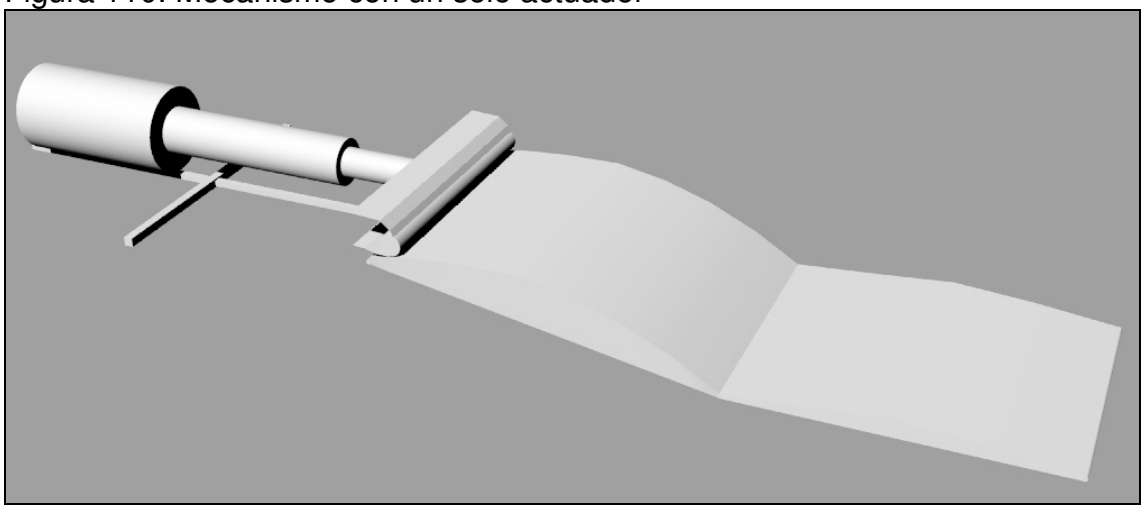
Figura 109. Descripción del movimiento



Diseño del autor

Ahora habría que determinar las posibilidades que presentan para este mecanismo. La primera posibilidad que se tiene es la utilización de un solo actuador que, trabajaría por todo la zona de la lámina, mejor dicho abarcando su longitud.

Figura 110. Mecanismo con un solo actuador



Diseño del autor

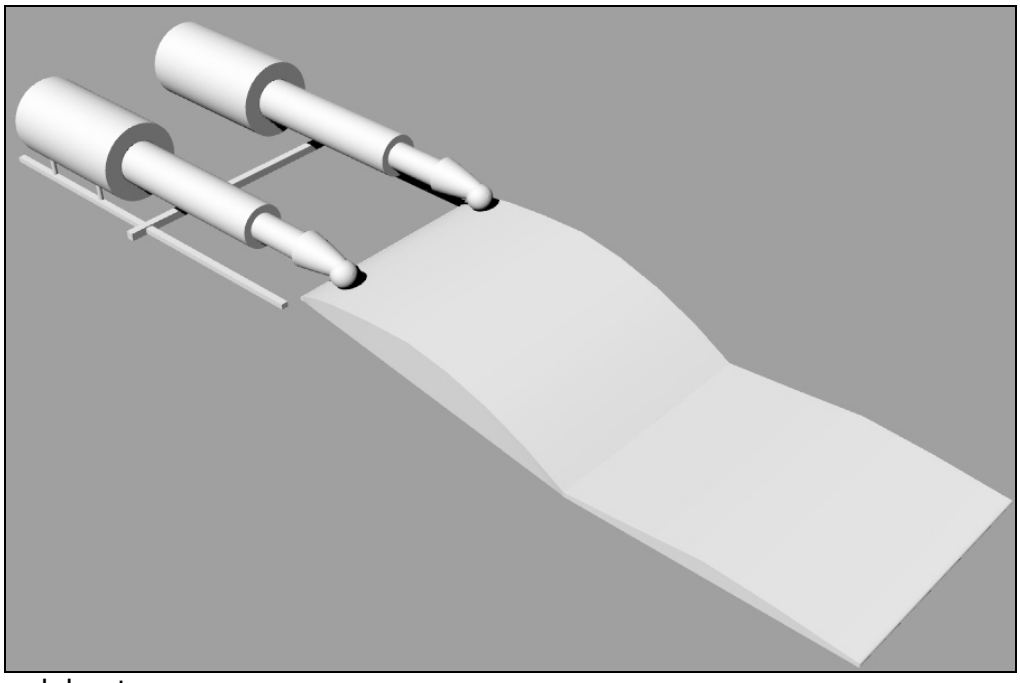
12.6.2 Mecanismo con un solo actuador. Como se observa en la figura 149 el actuador está centrado sobre la lámina debido a que el rodillo tiene que abarcar toda la longitud de la lámina, para que la fuerza ejercida por el rodillo sea bien distribuida en toda la superficie con el fin que el movimiento sea nivelado y no se presenten inclinaciones que produzcan un variación en el flujo.

Este tipo de mecanismo presenta algunas ventajas en cuanto a disminución de pesos, pero necesita mayor fuerza de trabajo para que pueda mover el rodillo con eficiencia. En cuanto a costos seria más ventajoso ya que solo dispondría de una unidad de actuación.

Con respecto al movimiento será totalmente igual a lo mencionado anteriormente, las flechas sobre la figura 109 indican los puntos mínimos –medios –máximos respectivamente

12.6.3 Mecanismo con un solo actuador. Este sistema como lo dice el encabezado se compone de dos actuadores en cada extremo o en cada guía de la lamina.

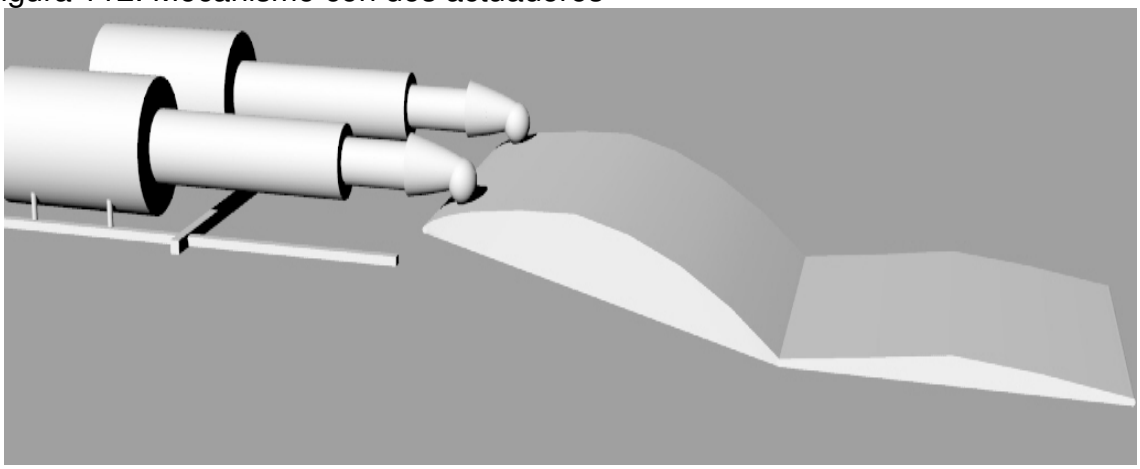
Figura 111. Mecanismo con dos actuadores



Diseño del autor

Como se puede observar en la figura la ubicación de los dos actuadores se ubican en los extremos de la lámina con el fin de poder darle un movimiento más eficaz y un poco más rápido que anterior. Este sistema posee ventajas en cuanto a rapidez de movimiento, pero los costos tienden a ser mayores que los anteriores, ya que se tienen dos unidades actuadotas por ende el costo es mayor.

Figura 112. Mecanismo con dos actuadores



Diseño del autor

Dentro de todos los tipos de mecanismo estudiados hasta el momento, todavía no se puede determinar uno ya que se necesita desarrollar el estudio cinemático de los mecanismos y así de esta manera entrar a escoger el mas eficiente y sencillo para nuestras necesidades de estudio.

12.7 ANALISIS DEL MECANISMO CON DISPOSITIVO DE ACTUADOR PIVOTE

El análisis con dispositivo de actuador pivote, es un análisis que lo que busca es permitir que la interacción del actuador con respecto a la posición de la alamina sea la mejor, debido a que se presentaban problemas con el sistema mencionado en el sub - capítulo anterior en donde el análisis con el dispositivo del cam no era tan eficiente debido a que el cam todo el tiempo esta soportando la carga que le ejerce el flujo al vectorizarse la tobera debido a que el flujo choca con las paredes y trata de fracturar el vástago ya que este se encuentra fijo y además paralelo a la dirección del flujo. Otro problema que presenta debido a que se encuentra fijo el cilindro la distancia de longitud de vástago es mucho mayor para el caso de la vectorización a ángulos a máxima posición, aunque para el caso de el actuador pivote el problema de la longitud también se presenta.

En este caso del actuador pivote presenta mejorar a los problemas del sistema de cam mencionados anteriormente, debido a que este puede pivotar en punto adecuado, el cilindro adopta la posición mas optimo dependiendo de la longitud del vástago con el fin de que la carga a la que esta sometido el actuador, que en si el que la soporta en su mayoría es el actuador pueda ubicarse de forma correcta para poder contrarrestar la carga con el mínimo esfuerzo y así no poner en riesgo al vástago de una fractura debido a la fuerza que le ejerce el flujo.

Debido a este en la sección del diseño del sistema de actuación se debe determinar desde el punto de vista de rendimiento cual de los dos tipos mencionados anteriormente es el mejor para las necesidades que se tengan, teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones que cada sistema presenta para si poder desarrollar los cálculos necesarios para determinar las características del cam o las características del punto de pilotaje.

13. SISTEMA DE ACTUACIÓN

Luego de tener la idea general sobre el análisis del mecanismo de movimiento de la tobera, es necesario calcular e identificar el tipo de componentes y de sistema, por medio del cual este diseño tendrá movimiento, para esto se debe tener en cuenta algunas recomendaciones que le permitirán obtener un componente más eficiente. De esta manera, se debe observar al momento de la selección lo siguiente:

- Componentes económicos que soporten las características de trabajo para las que son diseñados.

- El sistema debe ser lo mas sencillo posible, para evitar el aumento de peso en el avión así como también el espacio.

- Se debe tener en cuenta también que el acceso para requerimientos de mantenimiento no sea complicado, esto con el fin de facilitar los trabajos de reparación o chequeo necesarios.

- Se debe garantizar un sistema alterno de seguridad, que en caso de presentarse una falla, se pueda accionar para dejar el sistema en condiciones mínimas y seguras de operación.

De esta manera para comenzar el análisis del funcionamiento del sistema, se sugiere utilizar un sistema hidráulico de acuerdo a la información mostrada en el marco teórico de este proyecto (capítulo 6.4.4). Esto se recomienda teniendo en cuenta las fuerzas con las cuales el sistema tendrá que trabajar, un sistema como estos, permitirá regular el movimiento de la tobera mas fácilmente a través de una combinación entre electrónica e hidráulica de control, además, proporcionará un medio mas seguro y económico de trabajo.

Entre las desventajas que encontramos en este tipo de sistemas se encuentra que el número de componentes que se utilizarán es elevado, incrementando el peso del motor en general, además, el costo por la fabricación de los materiales para

este tipo de componentes, también será un poco elevado, esto a causa de la posición en el motor y del mecanismo articulado de la tobera.

A continuación se ilustrarán los componentes principales que pueden ser utilizados para el diseño del sistema, teniendo en cuenta su efectiva aplicabilidad y su uso adecuado.

NOTA: En la siguiente parte no se explicarán componentes que no sean indispensables para el desarrollo del sistema de control hidráulico, exclusivamente todo será enfocado hacia la implementación de los elementos principales.

Nota: El procedimiento para diseñar el sistema de actuación hidráulico que se mostrará a continuación es aplicable para cualquiera de los tipos de métodos de vectorización explicados anteriormente, el único aspecto importante que se debe mencionar es la variación de las dimensiones geométricas, el número, la disposición y el tamaño de los actuadores.

13.1 SISTEMA DE CONTROL Y FUNCIONAMIENTO

La integración de los sistemas y componentes de manejo de todo el equipo, juegan un papel importante en el diseño y análisis del mismo, ya que a partir de el se desarrollará un sistema que permita tener un grado de efectividad bastante alto, al momento de realizar cualquiera de las operaciones para la cual es creado.

Los sistemas de control se desarrollaron en una primera instancia, de acuerdo a la definición propuesta por el autor PHd. Sergey Doroshko, como un "sistema el cual está hecho para el manejo (control o gobierno) de diferentes objetos técnicos sin el trabajo o participación directa del hombre debido a que el sistema debe regularse por si mismo"[11].

Según Doroshko, este sistema se divide en 2 componentes principales:

[11] DOROSHKO, Sergey. Automatics of Aircraft Engines Part I Basics of Automatics. Bogotá D.C.: Editorial Bonaventuriana. 2004. 1-61p.

- Un objeto de control: Se maneja en función de unos parámetros controlados (parámetros de salida de un objeto), que pueden ser parámetros eléctricos, mecánicos, térmico, hidráulico, etc.

- Dispositivo de control automático: Este componente se encargará de regular o controlar al objeto de control, teniendo en cuenta la posible variación del que se encuentren durante la operación normal del sistema.

De la misma manera los sistemas de control se pueden clasificar según los siguientes tipos:

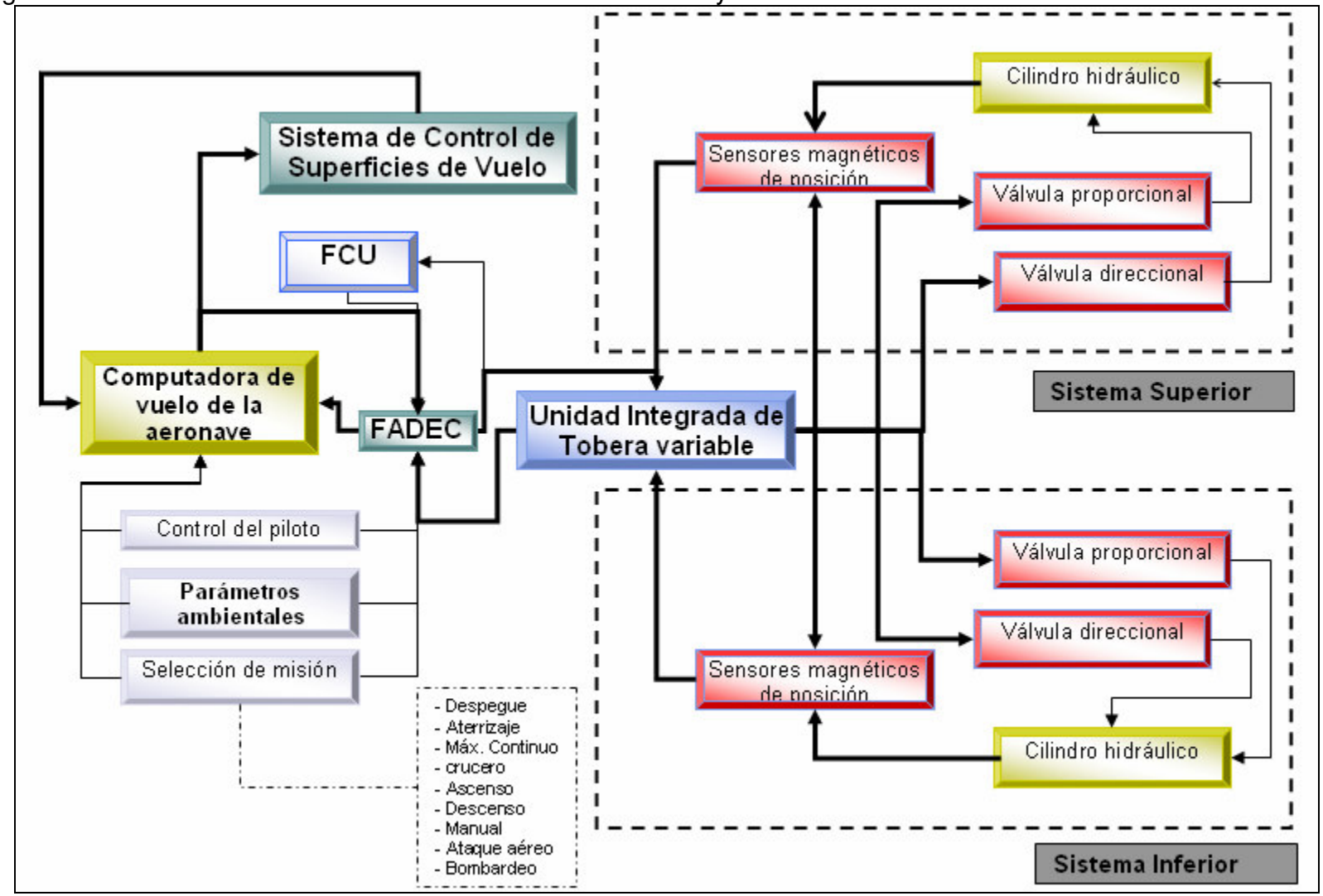
- Sistemas de lazo abierto: En estos sistemas el gobernador opera el objeto de control sin que se tenga información real acerca del parámetro que está siendo controlado. En este tipo de sistemas la influencia del ambiente se ejerce sobre el gobernador y el objeto de control simultáneamente generándole una mejor operación ya que reacciona inmediatamente a dichas variaciones externas.

- Sistemas de lazo cerrado (*feedback*): El gobernador opera el objeto de control estando ambos elementos conectados por una acción controlada, en función de los parámetros de salida del objeto de control, que se vean modificados por condiciones externas. Este conjunto se caracteriza por su gran exactitud, aunque es bastante sensible a cualquier variación que se produzca sobre el objeto de control[12].

Luego de tener una idea general del funcionamiento de los principales sistemas de control, es necesario explicar analógicamente como será el trabajo normal del sistema de control de la tobera y su interfase con el sistema hidráulico preliminar que será evaluado más adelante. Aunque el desarrollo del mismo requiere un estudio adicional que no será parte de este proyecto, a continuación se explicará de una manera general como puede trabajar tentativamente el sistema y que componentes básicos necesitará.

[12] Ibid 11. 61p.

Figura 113. Interacción básica entre el control de la aeronave y la tobera vectorial



Diseño del autor

La figura 113 muestra la representación esquemática del sistema de control y su interfase entre la cabina de vuelo y el sistema hidráulico. Este sistema es del tipo lazo cerrado, requerido así, teniendo en cuenta el concepto de que para el funcionamiento óptimo de este conjunto es importante obtener un alto grado de precisión en el posicionamiento de la tobera. La parte de velocidad de actuación se puede asumir primeramente como función del sistema hidráulico.

En el esquema se muestra el funcionamiento básico de posicionamiento de la tobera. Para realizar los diferentes movimientos, el sistema de actuación comprenderá inicialmente 2 sistemas, un sistema para la actuación de la parte superior (**Sistema superior**) y un sistema para manejar la parte inferior de la tobera (**Sistema inferior**).

Asumiendo el caso más simple, se tomará en cuenta el caso de vectorización tipo 4, en el cual la tobera se movería como un solo conjunto (los componentes de variación geométrica interna no se tendrán en cuenta). Para este caso, la actuación hidráulica puede estar dada por 2 cilindros que van a estar ubicados en los contornos superior e inferior de la misma, colocando a la tobera en la posición que sea necesitada por medio de la variación de la posición de los vástagos. Este sistema y el esquema anterior son aplicables para cualquiera de los métodos de vectorización que se plantearon en el capítulo 8, lo único que variará será el número de actuadores requeridos, así como también, el posicionamiento de los mismos.

Cada uno de los cilindros variará su posición en función de la cantidad y dirección de flujo que las válvulas proporcionales de cada sistema (superior e inferior), les permitan recibir. Cada una de estas válvulas está conectada a una Unidad Integrada de Tobera Variable. Esta unidad se encarga de enviar una señal electrónica a cada válvula, para que se ubique en una posición y tiempo determinados. Adicionalmente, envía una señal a sensores magnéticos, los cuales pueden estar ubicados sobre la superficie de la parte exterior de la tobera dinámica, ó, sobre los contornos laterales de la estructura estática de la tobera y se encargarán de fijar, en una posición determinada, a la tobera según se necesite.

Dependiendo del requerimiento de vectorización necesitado, esta unidad proveerá una señal a un sensor de cada sistema, para que cuando el actuador realice su desplazamiento normal a través de la lámina, se detenga al encontrar el sensor magnético. Cuando el sensor magnético determina que el extremo del vástago ha llegado a la posición requerida, él envía una señal a la Unidad Integrada de Tobera Variable, la cual suspende la señal electrónica que está siendo enviada a

las válvulas proporcional y direccional de cada sistema, para cerrar el flujo de fluido hidráulico que va hacia los cilindros.

La Unidad Integrada de Tobera Variable está acoplada a un sistema de control del motor de tipo FADEC (*Full Authority Digital Engine Control*), este sistema se encarga de regular los parámetros de funcionamiento del motor en función del régimen de operación, los mandos ejecutados por el piloto y las condiciones ambiente. El FADEC computa esos datos y suministra una señal electrónica de salida a la Unidad Integrada, para que esta a su vez, envíe la señal a las válvulas y sensores correspondientes, para que ubique en la posición más óptima de funcionamiento a la tobera.

El FADEC esta asociado además de esto con la FCU (*Fuel Control Unit*) regulando los parámetros de flujo de combustible por medio de la FCU y la variación del posicionamiento de la tobera se obtendrá la mejor eficiencia en la operación del motor.

Además de lo anterior, en conjunto principal el FADEC está unido a una unidad de control de vuelo del avión (Computadora de vuelo de la Aeronave) mediante la cual se regulará el posicionamiento de las superficies de control y el FADEC, para que mediante esta interfase se gradúe la posición óptima de los diferentes componentes para que la aeronave pueda realizar las maniobras de la mejor manera posible.

13.2 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE ACTUACIÓN

Nota: El lector deberá conocer previamente el funcionamiento básico de los sistemas de actuación, esto con el fin de garantizar el entendimiento del equipo, así como también, la compresión de los componentes y su función dentro del sistema.

Nota: El diseño del sistema hidráulico se específica hacia el estudio de los componentes principales y su actuación, en esta parte no se tendrá en cuenta la regulación de electrónica del mismo, por ser un estudio que se debe realizar a parte, lo cual es tema de otro proyecto.

13.2.1 Esquema del circuito hidráulico. Seguidamente, es necesario definir o hacer un esquema inicial del sistema hidráulico con sus diferentes componentes,

en él se mostrarán los elementos básicos que el sistema utilizará. En general, para un sistema hidráulico se pueden definir los siguientes:

- Bombas.
- Depósito o tanque.
- Líneas de flujo hidráulico (tubos, mangueras).
- Válvulas.
- Accesorios (filtros, acumuladores, etc.).
- Actuadores.
- Fuente de poder (motor eléctrico, etc.).
- Posición de los sensores magnéticos.

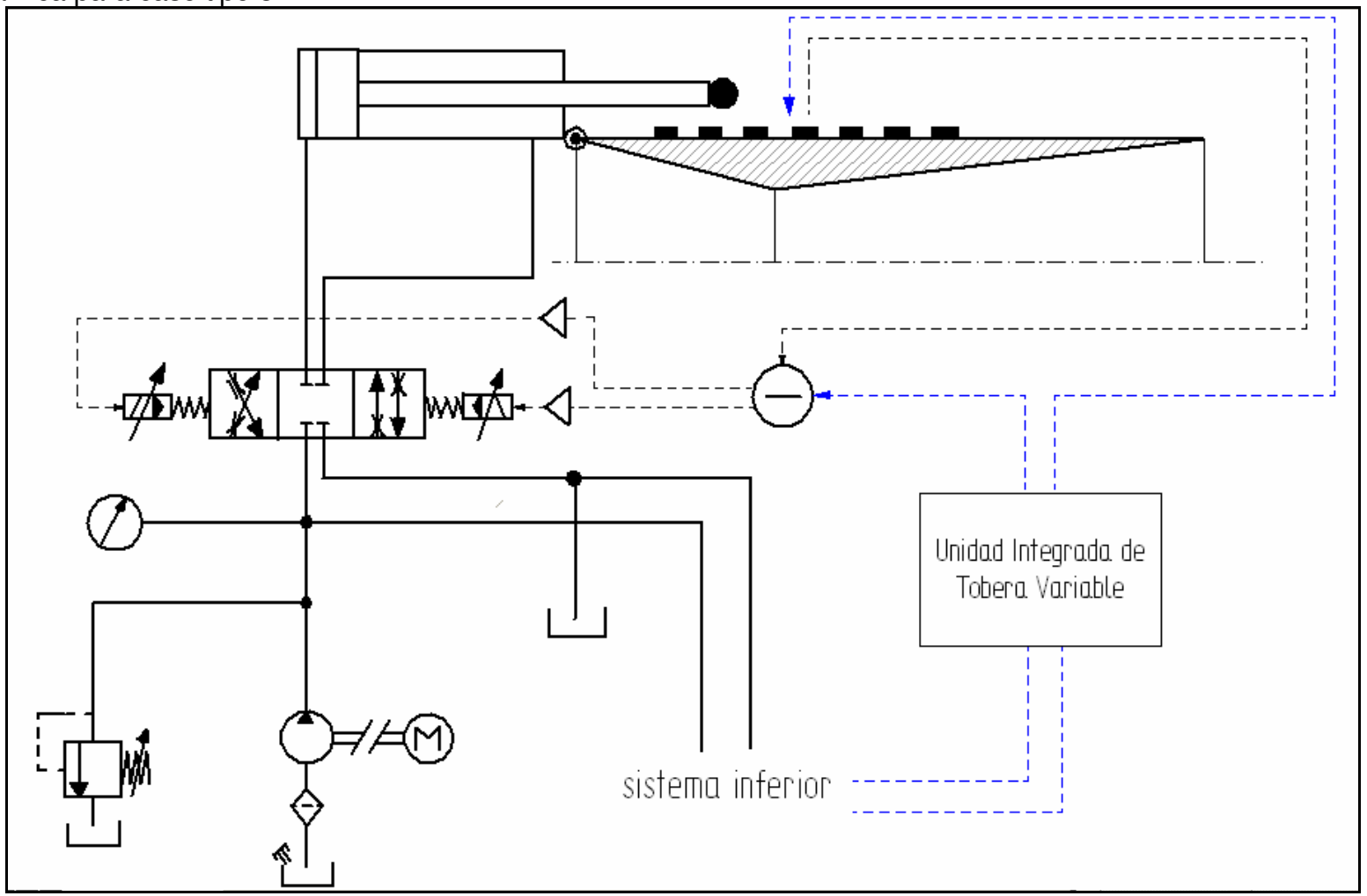
NOTA: El esquema será el mismo para todas las posibilidades propuestas en este propuesto, lo que cambiará será el número de actuadores hidráulicos y su posicionamiento a través de la tobera.

1) En el esquema se hará necesario representar las posiciones y los elementos básicos de nuestro sistema, en el se deben tener en cuenta, el número de cada componente, ya que por un lado se puede incrementar el rendimiento del equipo, pero por el otro lado, se puede incrementar mucho el costos y el peso de todo el sistema lo cual no resultaría viable para el proyecto.

El esquema debe estar basado en un análisis previo lógico ó primera aproximación en el cual se asuma de una forma muy general, como se quiere que el sistema trabaje, y además, como la cantidad adecuada de elementos seleccionados deberá interactuar para proporcionar la operación deseada, teniendo en cuenta los estándares mínimos de seguridad y los costos que estos puedan generar.

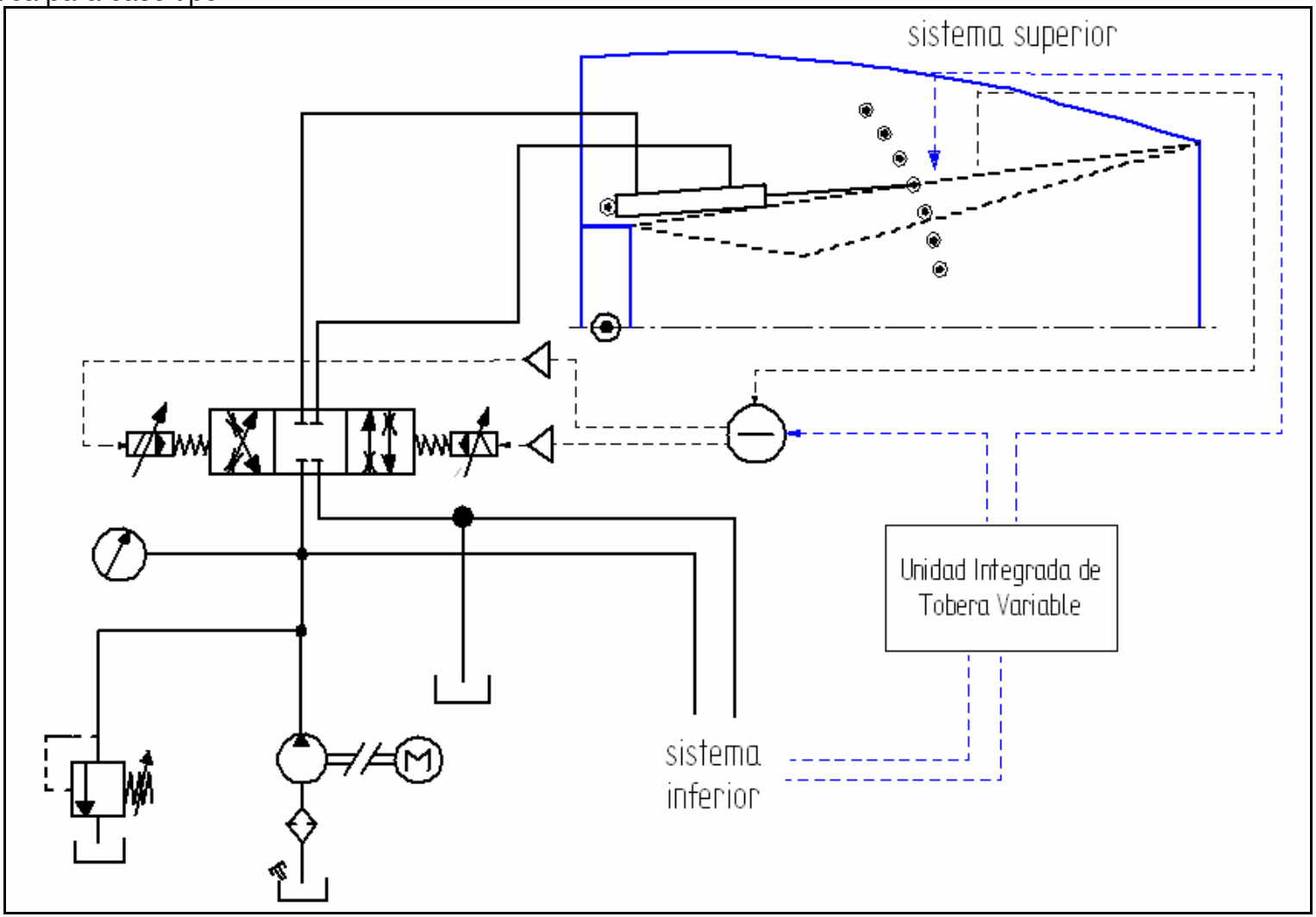
1) Para observar el esquema remitirse a la figura 114 y 115.

Figura 114. Esquema hidráulico de componentes de actuación de la tobera sensores magnéticos sobre lámina dinámica para caso tipo 3



Diseño del autor

Figura 115. Esquema hidráulico de componentes de actuación de la tobera sensores magnéticos sobre sección estática para caso tipo 4



Diseño del autor

Nota: A continuación se describirán las características de funcionamiento que han de ser asumidas para el sistema en general. En este punto, se desarrollará el análisis básico para el sistema tipo 4 (figura 115), el cual proporcionó los mejores resultados para vectorización según los análisis anteriores, sin embargo, es necesario recalcar que este análisis es aplicable para cualquiera de los otros tipos de vectorización en los cuales lo único que variará será las dimensiones geométricas, el número, la disposición y el tamaño de los actuadores.

13.2.2 Selección inicial de los actuadores hidráulicos. Conociendo el funcionamiento y mecanismo del sistema en general, así como también, teniendo una idea de las fuerzas que sobre el mismo van a actuar, es importante que se tenga una noción del tamaño y longitud de los actuadores hidráulicos, ya que en este tipo de casos, es necesario tener en cuenta el espacio que se utilizará para los elementos y componentes adicionales que la tobera necesite, con el fin de proporcionar un óptimo funcionamiento.

Como se puede predecir, los cilindros no pueden tener un diámetro muy exagerado porque esto causaría un aumento excesivo del tamaño total de la tobera, tampoco se pueden tener muchos, porque esto complicaría los procesos de mantenimiento y ensamble del conjunto en general, además de que se incrementarían los costos de producción.

El actuador tiene que satisfacer los requerimientos de movimiento mecánico para lo cual es diseñado, por esto necesario que se tenga en cuenta su forma y tamaño; existen mecanismos que moverán superficies ya sea por transmisión de fuerza (a través de empotramientos a la estructura (caso tipo 1 y tipo 4)) o por movimiento de un vástago con final giratorio (sobre mecanismos de rodillo sobre una guía tipo biela (Caso tipo 2 y tipo 3)), todo según como fue explicado en el capítulo 11.

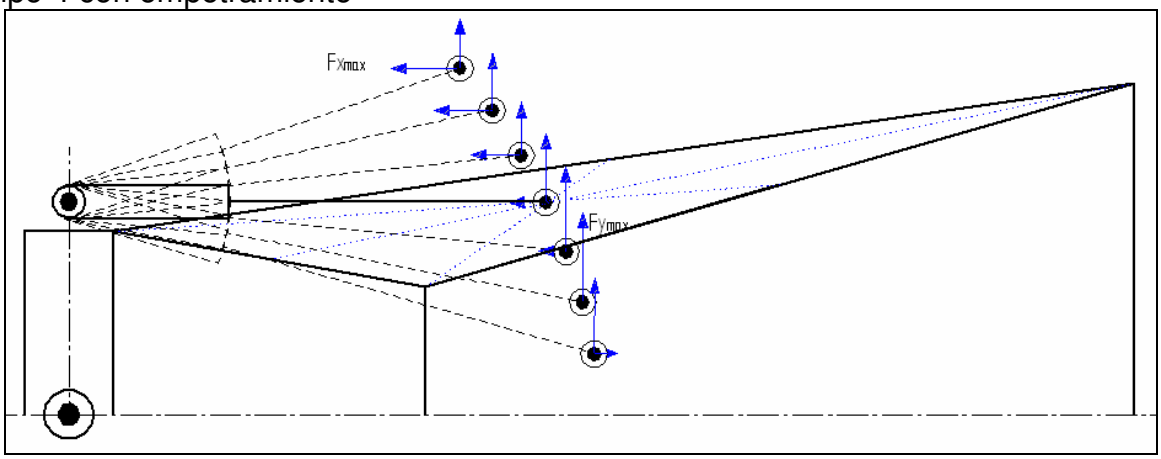
Los actuadores hidráulicos se propone colocarlos en las partes superior e inferior del conducto de salida del post – quemador, ubicándose inmediatamente antes del inicio de la tobera como se mostró en la figura 109, sin embargo se debe evaluar adecuadamente para calcular la mejor opción de posicionamiento.

Existen dos posiciones ideales de los actuadores según el tipo de mecanismo que sea utilizado, estos son:

13.2.2.1 Actuador movimiento pivotado. Este tipo de método es utilizado con un mecanismo que conste de un anclaje. Este empotramiento se encuentra en el centroide, el actuador se recomienda debe estar pivotado en las posiciones externas donde se encuentra el acople de la tobera con el post – quemador. El esquema se puede observar en la figura 116.

La posición inicial de la tobera se encuentra paralela al eje de la misma, en función de esto, se pueden calcular las fuerzas requeridas sobre la estructura y sus respectivas componentes. La magnitud de la fuerza se asumirá constante ya que como se observó el perfil de distribución de presión total permanece casi constante para cualquiera de los ángulos de vectorización propuestos, sin embargo, sus componentes horizontal y vertical cambiarán para mantener la resultante constante.

Figura 116. Esquema de distribución resultante de fuerzas en vectorización caso tipo 4 con empotramiento



Diseño del autor

Este tipo de método de ubicación tiene la ventaja de que la fuerza siempre estará aplicada sobre el centroide. Sin embargo, entre sus principales desventajas se encuentra que la longitud del vástago puede llegar a ser muy larga para algunos casos, además debe analizarse muy bien el aseguramiento del actuador ya que este debe pivotar con un alto nivel de seguridad.

Observando el esquema anterior se puede notar que las cargas aplicadas en el eje y serán las cargas que tendrá que contrarrestar en mayor medida la estructura de soporte del actuador, así mismo, teniendo en cuenta las cargas que actúan sobre el eje longitudinal (x), el cilindro hidráulico tendrá que regular el movimiento,

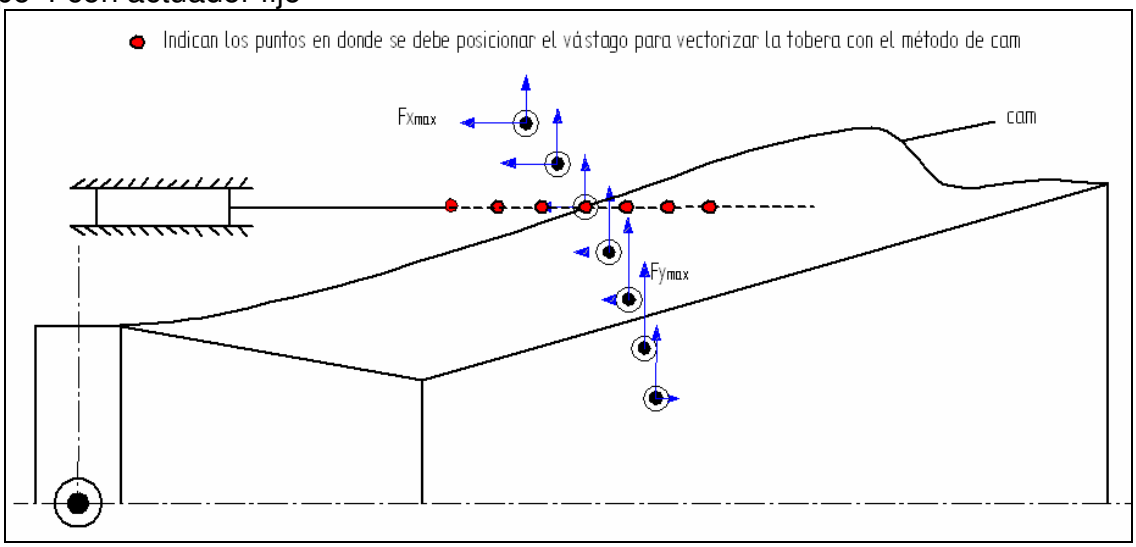
para que por causa de estas fuerzas, no ocurra ninguna variación en la posición de la tobera para el régimen seleccionado.

La fuerza que será aplicada sobre los diferentes cilindros, estará dirigida directamente al centro resultante de fuerzas, que el cual se mostrará para cada caso de vectorización en la figura 116 y estará en función del ángulo de vectorización correspondiente.

Para el esquema los puntos máximos de Fx se pueden observar para el régimen vectorizado de +15º y para el Fy en aproximadamente -10º. Sin embargo, esto simplemente se muestra esquemáticamente, no son valores reales.

13.2.2.2 Actuador estático. Este modelo de ubicación resulta más efectivo para la aplicación al mecanismo de tipo cam, para este caso el actuador se encuentra en una posición estática y simplemente a través de la variación en la longitud del vástago se regula la posición de la tobera.

Figura 117. Esquema de distribución resultante de fuerzas en vectorización caso tipo 4 con actuador fijo



Diseño del autor

Aunque se recomienda colocar el cilindro en un soporte estructural cercano al post – quemador, o en el acople de la tobera, se debe realizar un estudio alterno para ubicar el cilindro de la manera en que mejor se pueda economizar espacio.

Para esta se debe generar una compleja geometría y una perfecta sincronización entre el cam y el cilindro, lo cual dificulta el proceso de diseño del componente. Adicional a esto la fuerza ejercida por el cilindro no estará aplicada al centro de fuerza resultante directamente para los distintos casos de vectorización, esto se puede observar en la figura 117. De la misma forma que el caso anterior, el esquema solo muestra esquemáticamente una distribución ideal.

De la misma forma que para el caso anterior, la longitud del vástago puede llegar a ser muy larga lo cual no es adecuado para la selección del actuador.

Observando los 2 modelos básicos de ubicación de actuadores se puede concluir lo siguiente:

- La aplicación de los cilindros fijos es adecuada para todos los casos de vectorización estudiados previamente.

- La aplicación de los cilindros pivotados es adecuada para los casos de vectorización tipo 1, 3 y 4, ya que para el diseño del tipo 2, resulta más simple generar un sistema fijo a la estructura.

- En muchos de los casos resulta que la longitud requerida del vástago es muy larga, lo cual no es adecuado por efecto de peso, resistencia estructural y transmisión de fuerzas.

Acorde a lo anterior se ve la necesidad implementar un sistema adicional que permita la transmisión de fuerzas y reduzca la longitud del vástago. Esto se puede realizar por medio de un acople tipo mecánico.

13.2.2.3 Acople mecánico para transmisión de fuerzas. Como se dijo anteriormente, el acople se encargará de transmitir la fuerza que provee el sistema hidráulico a la lámina de la tobera.

- Este acople debe garantizar bajo peso, resistencia estructural y buen desempeño del mecanismo.

- La estructura debe ser simple, de fácil acople y diseño.

- Debe transmitir uniformemente las fuerzas sobre la lámina de la tobera.

El cálculo de la longitud del acople será calculado posteriormente.

13.2.3 Cálculo de la fuerza máxima soportada por los actuadores. Como se pudo observar anteriormente, el sistema se encuentra en equilibrio estáticamente, y es por esto que las fuerzas que deben ser ejercidas por los actuadores van a ser mínimas. Es así que, los actuadores deben estar diseñados bajo un concepto adicional de fuerzas, estas, se manifestarán como variaciones atípicas en el funcionamiento de la tobera, y se identifican como un estándar que debe ser tenido en cuenta por efectos de seguridad.

Ejemplos de lo anterior, se pueden observar en casos en donde la presión interna aumente, esto generará intentos de cambio en la posición de la tobera, lo cual no es conveniente para efectos de operación. Los excesos de carga aumentarán las fuerzas sobre los actuadores y estos deben soportar por normas de seguridad, al menos hasta cierta magnitud.

Adicional a esto, la fuerza que será ejercida por el actuador debe estar en la dirección del centroide del componente, y su magnitud variará en función del ángulo de vectorización. Antes de observar el desarrollo del procedimiento de análisis de esta parte, es necesario tener en cuenta algunas condiciones de funcionamiento y diseño del sistema en general.

- Este sistema tendrá en su diseño el análisis para mínimo dos actuadores por lámina, es decir, dos para la parte superior y dos para la parte inferior: El diseño está realizado bajo la filosofía de falla segura con lo que se asegura que al menos uno de los 2 cilindros pueda soportar el exceso de carga que se pueda presentar, en caso de presentarse una falla en cualquiera de los dos.

- El exceso de carga será de aproximadamente 6000 a 10000 lb (26689.33N-44482.22N). NASA: “Este criterio de exceso de carga fue evaluado y analizado para las pruebas del motor F100-PW-229, con vectorización axisimétrica”[12].

[12] http://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/89247main_setp_d6.pdf#search='vectoring%20nozzle'

1) La variación de la fuerza aplicada en dirección al actuador con respecto al régimen de vectorización se puede observar en la tabla 17. La carga de diseño seleccionado para este caso será la máxima y se aproximará al valor más exacto para efectos de diseño:

$$F_{ad} = 44482.22N \cong 50000N$$

1) Para el caso propuesto se puede observar la tabla 24.

$$\psi + 90° = 98.2° = ángulo - de - la - fuerza - total - ejercida - por - la - tobera$$

Tabla 17. Variación de la fuerza requerida por el actuador en función del ángulo de vectorización

Ángulo de vectorización (α)	F_{ad} (N)	$Fx_{adicional} = F_{ad} \bullet sen((\psi + 90°) + \alpha)$	$F_{cilindro}(N) = \frac{Fx_{equivalente\ total}}{\cos(\alpha + 180)}$
15	50000	-19697,10	20391,9338
10	50000	-15616,75	15857,6594
5	50000	-11417,54	11461,1567
0	50000	-7131,45	7131,4467
-5	50000	-2791,08	2801,7367
-10	50000	1570,54	-1594,7660
-15	50000	5920,20	-6129,0404

Diseño del autor

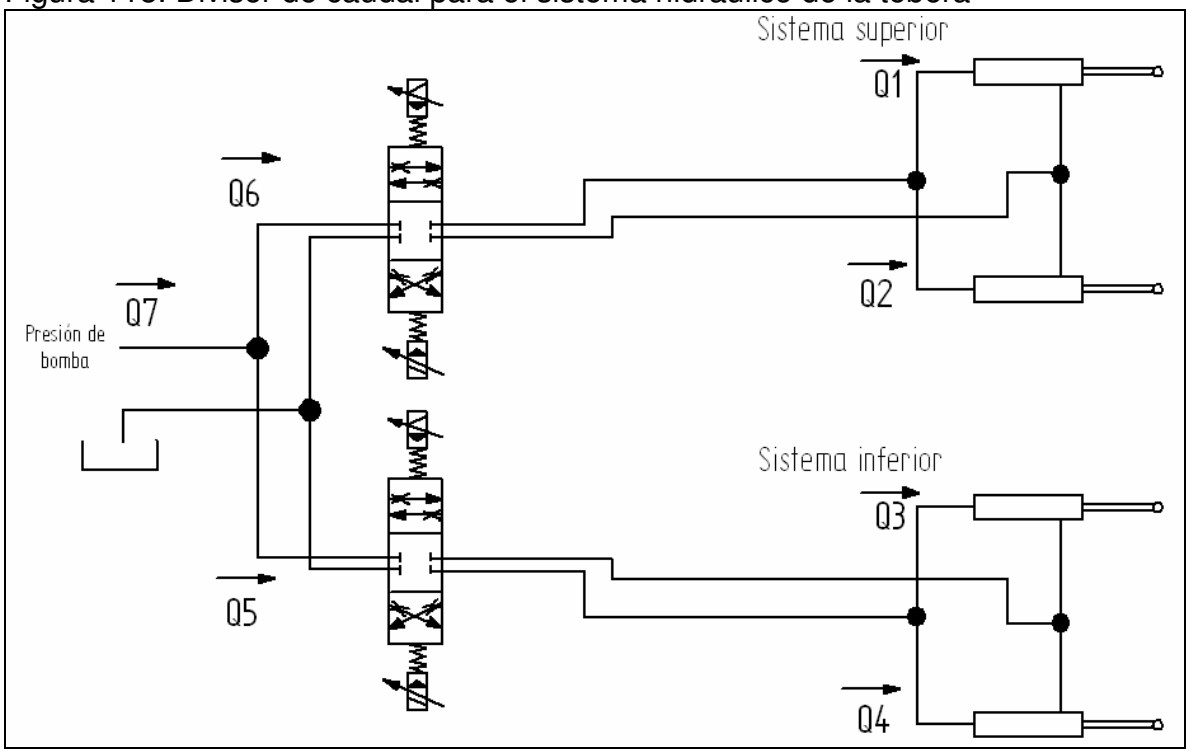
En la tabla 17 se muestra el requerimiento de fuerza de un solo cilindro para soportar una sobre carga dada de hasta 50000 N.

13.2.4 Cálculo del actuador hidráulico. En el diseño de los cilindros es necesario tener en cuenta que el caudal será dividido en cuatro partes, la mitad del caudal será dirigido hacia los cilindros superiores, y la otra mitad, será llevada hacia los actuadores inferiores. Esto se representa en el esquema de la figura 118.

El divisor de caudal mínimo para este caso se puede expresar matemáticamente como:

$$Q_7 = Q_5 + Q_6 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

Figura 118. Divisor de caudal para el sistema hidráulico de la tobera



Diseño del autor

Tabla 18. Generalidades de algunas bombas hidráulicas

Bomba	RPM's	Power required max (Kw)	Presión operacional (psi/Pa)	Caudal (L/min)
PVP 065	2500	16,3	3000/2.068427e+007	39,7
PVP 160	2500	27,1	3000/2.068427e+007	62
EATON Model 70122	2500	20	3000/2.068427e+007	41,6
EATON Model 70422	2700	40	3000/2.068427e+007	98,4
EATON Model 70423	3000	60	3000/2.068427e+007	125
EATON Model 70523	2500	70	3000/2.068427e+007	159

Diseño del autor

Además de esto, es necesario recordar que la presión no se divide como pasa con el caudal suministrado por la bomba, sino que simplemente se verá afectada en su magnitud por efecto de la fricción y la velocidad del fluido.

13.2.5 Presión mínima de operación del sistema hidráulico. Esta presión se define acorde a la presión nominal con la cual funcionan los sistemas hidráulicos utilizados comúnmente en la industria de la aviación y especialmente, en la actuación de diferentes componentes dentro de la aeronave, tales como superficies de control, trenes de aterrizaje, etc. (ver tabla 18).

En este punto se requiere tener en cuenta, que el valor nominal de presión debe estar por debajo de la presión operativa de la bomba, esto es debido a que internamente en el sistema, existirán caídas de presión, que disminuirán la presión que es suministrada por la bomba.

2) Seguidamente conociendo la fuerza requerida, es posible calcular el diámetro del pistón requerido para mover el componente, teniendo en cuenta los lineamientos de tamaño y estructura explicados anteriormente, esto se puede realizar mediante iteraciones en donde variando el diámetro del pistón entre unos valores determinados, se puede determinar cual es el más efectivo para una presión establecida. Para aplicar el procedimiento se utiliza la siguiente fórmula:

$$P\min_{dis} = \frac{Fpist}{Apist}$$

Donde:

$Pmin_{dis}$ = Presión mínima de diseño con la cual el sistema opera.

Fpist = Fuerza que ejerce el conjunto pistón vástago para mover la superficie.

Apist = Área del pistón sobre la cual el fluido hidráulico ejerce la presión.

Despejando se obtiene:

$$Apist = \frac{Fpist}{P\min_{dis}}$$

Con el área del pistón igual a:

$$Apist = \frac{\pi(\phi pist)^2}{4}$$

$\phi pist$ = Diámetro del pistón hidráulico.

Igualando las ecuaciones y despejando el diámetro:

$$\frac{\pi(\phi pist)^2}{4} = \frac{Fpist}{P\min_{dis}}$$

$$(\phi pist)^2 = \frac{4Fpist}{\pi(P\min_{dis})}$$

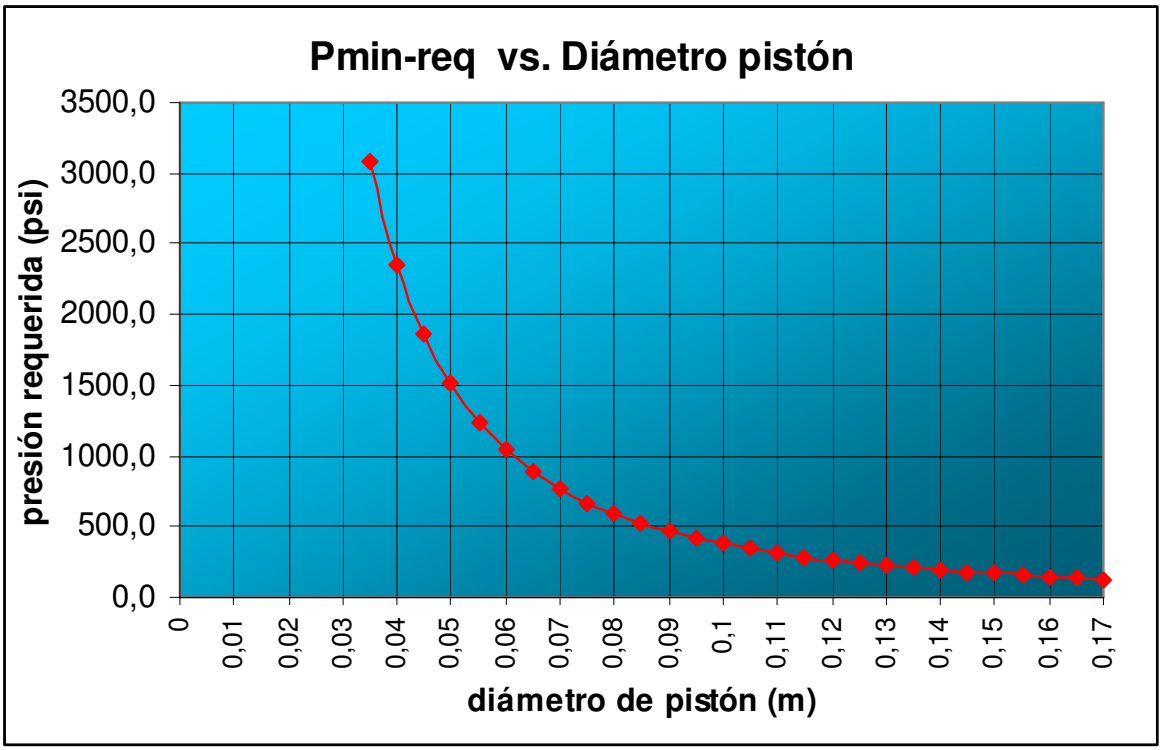
$$\phi pist = \sqrt{\frac{4Fpist}{\pi(P\min_{dis})}}$$

Por medio de esta ecuación se pueden calcular para diferentes diámetros, el valor de presión requerido.

2) Para el diseño actual se tienen los resultados se muestran en la tabla 19 y la figura 119.

Como se ha explicado anteriormente, para el caso tipo 4 se intentará dar movimiento a la tobera como un solo conjunto en el que las partes internas divergente y convergente serán constantes, y lo único que cambiará la dirección del flujo será la posición en la que se encuentre la tobera luego de ser posicionada por los actuadores y en función de los pivotes laterales.

Figura 119. Variación de la presión mínima requerida con respecto al diámetro del pistón



Diseño del autor

Tabla 19. Variación de la presión mínima requerida con respecto al diámetro del pistón

Φpistón(m)	Pmin-req (Pa)	Pmin-req (psi)
0,035	21194952,251	3074,1
0,04	16227385,317	2353,6
0,045	12821637,782	1859,6
0,05	10385526,603	1506,3
0,055	8583079,837	1244,9
0,06	7212171,252	1046,0
0,065	6145282,014	891,3
0,07	5298738,063	768,5
0,075	4615789,601	669,5
0,08	4056846,329	588,4
0,085	3593607,821	521,2
0,09	3205409,445	464,9
0,095	2876877,175	417,3
0,1	2596381,651	376,6

0,105	2354994,695	341,6
0,11	2145769,959	311,2
0,115	1963237,543	284,7
0,12	1803042,813	261,5
0,125	1661684,256	241,0
0,13	1536320,503	222,8
0,135	1424626,420	206,6
0,14	1324684,516	192,1
0,145	1234902,093	179,1
0,15	1153947,400	167,4
0,155	1080699,959	156,7
0,16	1014211,582	147,1
0,165	953675,537	138,3
0,17	898401,955	130,3

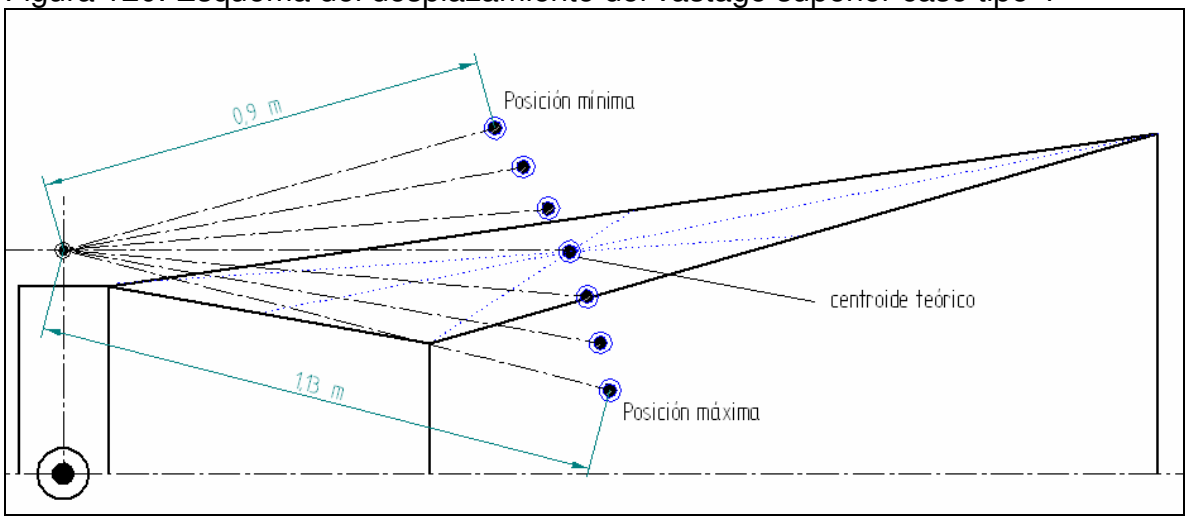
Diseño del autor

Nota: Como recomendación se sugiere colocar el final del vástago (la parte que ejerce la fuerza sobre la estructura para moverla) en los límites equi-distantemente del centro de presiones sobre el cual se han de generar las fuerzas resultantes en la estructura de la tobera. Esta observación exige que el diseñador tenga en cuenta que la posición del actuador no debe ser muy lejana, para que el efecto de los momentos que se puedan producir sobre el vástago sean los menores posibles, así mismo, el posicionamiento y la inclinación del cilindro hidráulico debe ser la más adecuada posible con el fin de encontrar una posición óptima en la cual el movimiento pueda ser realizado sencillamente y los accesos de mantenimiento sean los mejores posibles.

Luego de localizar en el esquema a escala el centro de presiones, es necesario colocar el cilindro hidráulico, teniendo en cuenta las componentes de fuerza que sobre el actuarán, en el esquema de la figura 120 se muestra el posicionamiento inicial que el cilindro tendrá, puede estar sujeto a cambios según los requerimientos de espacio y tamaño que se necesiten.

Entre las recomendaciones que se deben seguir para colocar el punto de pivote del actuador está primero que todo, que debe estar en el cruce de la línea vertical donde se encuentra el eje de pivote de la tobera y la línea paralela al eje de la tobera que corta con el centroide de la tobera. Sin embargo, este punto si es posible se puede colocar más adelanta para casos en donde se requiera disminución de espacio y se tenga un diámetro de actuador pequeño.

Figura 120. Esquema del desplazamiento del vástago superior caso tipo 4



Diseño del autor

En el esquema se muestra la posición de los cilindros, así como también, la distancia de recorrido del vástago con la cual se cumplen los requerimientos que se necesitan para mover el mecanismo. En este caso, los cilindros están unidos a empotramientos de la tobera, en cualquiera de los casos es posible utilizar el mismo cilindro para un sistema de mecanismo movido por lóbulo.

3) Para calcular el desplazamiento total del vástago, basta únicamente con utilizar la siguiente fórmula:

$$L = Desplaz._{\max} - Desplaz._{\min}$$

3) Donde para el ejercicio propuesto se tiene:

$$L = 1.13m - 0.9m$$

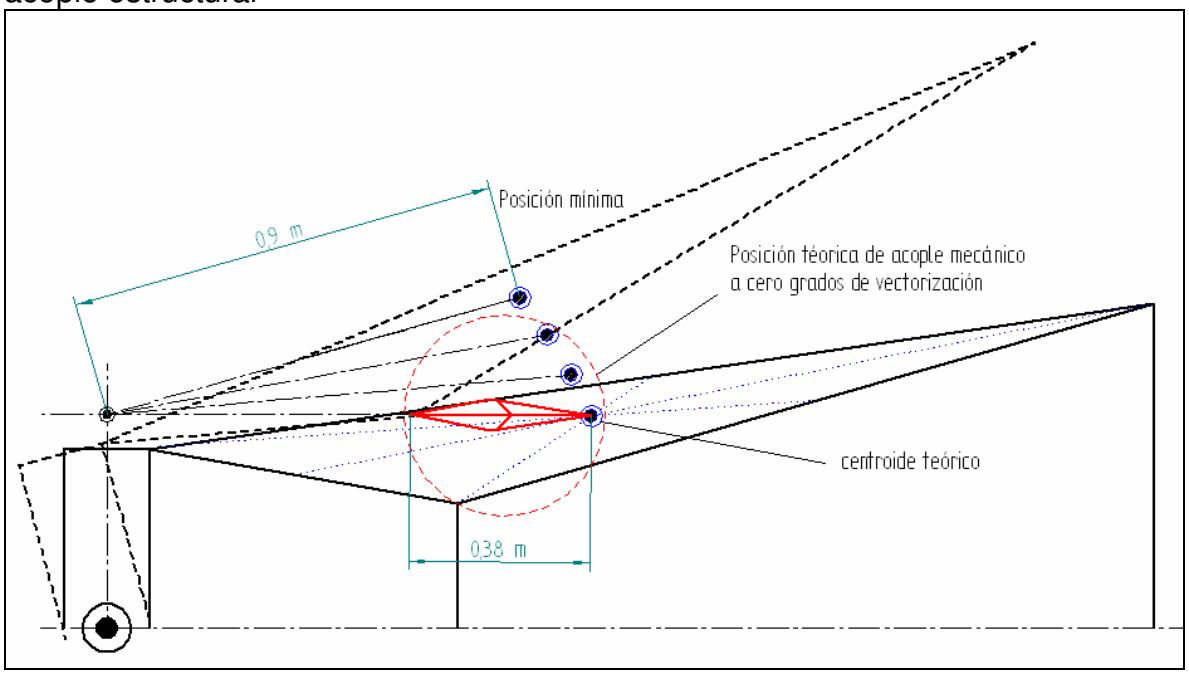
$$L = 0.23m$$

4) Como se puede observar, este desplazamiento es muy largo para un sistemas de actuador hidráulico simple, ya que cuando el mismo se encuentre en la máxima posición, tendrá que soportar muy altas cargas de momento de corte en su

vástago, lo cual no sería desde ningún punto de vista de diseño adecuado, ya que se tendría la posibilidad de tener algún tipo grave de daño estructural del mismo.

Es por esto que sería viable hacer un acople estructural al cilindro el cual transmitiera la fuerza generada por el cilindro (ahora más corto) a el centro de presiones de la estructura. El acople de ejemplo se puede visualizar en la gráfica de la figura 121.

Figura 121. Esquema del desplazamiento del vástago superior caso tipo 4 con acople estructural



Diseño del autor

Para calcular la longitud del acople mecánico, bastaría únicamente con utilizar la siguiente fórmula:

$$L_{actuador} \approx 2.2L$$

$$L_{acople} \approx L_{\min} - L_{act}$$

$$\boxed{L_{acople} \approx L_{\min} - 2.2L}$$

4) Resolviendo se obtiene:

$$L_{acople} \approx 0.9m - 2.2 \bullet 0.23m$$

$$\boxed{L_{acople} \approx 0.394m}$$

13.2.6 Definición de la velocidad de avance o retroceso. La velocidad de avance se define en función de la dirección de la salida del vástago del actuador, en este caso, todo el fluido hidráulico es aplicado sobre el área más grande (el área del pistón) dentro del cilindro provocando que el vástago se mueva saliendo de la parte interna del mismo.

Por el otro lado, se tiene que la velocidad de retroceso es la que depende del área más pequeña sobre la cual es aplicada la presión del fluido hidráulico (el área del pistón menos el área del vástago) y la que mueve el vástago hacia su posición original.

La velocidad requerida sea de avance o retroceso depende principalmente de lo que se necesite, si se quiere que el avance sea el movimiento más rápido, ó el retroceso, ó ambas tengan igual magnitud de velocidad.

Para asegurar que los cilindros (superiores e inferiores) trabajen a la misma velocidad y con el mismo caudal se debe observar la posibilidad de utilizar una válvula reguladora de caudal con la cual se variará el flujo de líquido hidráulico que ingresa al cilindro, de esta forma el tiempo de retorno aumentará para cumplir con un caudal de flujo constante que sea suplido por la bomba. El grave inconveniente que tendría esto, es que se aumentaría el peso del sistema por requerirse más elementos. El procedimiento se mostrará a continuación, y se basará en las ecuaciones para análisis de sistemas hidráulicos.

5) El caudal mínimo (aplicado sobre el volumen para llenar más grande) que se debe satisfacer para un solo cilindro se puede expresar como:

$$\boxed{Q\min_{dis} = \frac{\forall}{t}}$$

Donde:

$Qmin_{dis}$= Caudal mínimo de diseño que provee la bomba.

$\forall$ = Volumen de fluido total con el cual se desplaza el pistón en función de la carrera total del mismo.

t = Tiempo total en que se realiza el desplazamiento completo del vástago hasta la posición final.

De la ecuación anterior se deduce:

$$Q\min_{dis} = \frac{Apist \bullet L}{t}$$

Entiéndase L como el desplazamiento del vástago.

Donde también es posible tomar a la relación L-t como la velocidad de avance del actuador, así.

$$V_{avance} = \frac{L}{t}$$

$$Q\min_{dis} = Apist \bullet V_{avance}$$

NOTA: el tiempo máximo (t) para realizar el movimiento de la posición máxima a la mínima, o al contrario (vectorización +15° a -15°) se asumirá de 5 segundos (depende de los requerimientos de diseño).

Ahora se despeja el área del pistón y se iguala con la ecuación calculada previamente que está en función de la presión:

$$Apist = \frac{Q\min_{dis} \bullet t}{L} = \frac{Fpist}{P\min_{dis}}$$

Con esta ecuación se pueden distinguir los valores variables que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar la bomba y el actuador hidráulico requeridos. Así mismo, se muestran los valores que teóricamente deberían ser constantes, tales como el tiempo de recorrido (t), el desplazamiento total del vástago (L) y la fuerza requerida por el pistón (*Fpist*), los cuales fueron calculados previamente y por facilidad es mejor no cambiarlos, para que los cálculos previos no tengan que variar de la misma forma.

Al igual que para el caso de cálculo de la presión requerida es posible realizar las iteraciones correspondientes para observar el caudal requerido en función del diámetro del pistón. Los resultados para el análisis propuesto se pueden observa en la tabla 27.

Además de lo anterior, se debe notar la importancia de estudiar el caso de retorno del actuador hidráulico, si se asume como constante el caudal producido por la bomba se producirá un nuevo requerimiento, ya que el cambio de área efectiva (área del pistón menos el área del vástago) sobre la que el fluido aplica la presión es disminuido, lo cual generará una disminución en el tiempo de retorno, esto de cierta manera puede afectar la estructura del interna del cilindro, produciendo posibles daños mecánicos internos.

Para corregir lo anterior, la única solución adecuada es regular el caudal mayor del sistema que estará llegando a los actuadores durante el avance, de manera tal que se varíe el caudal provisto por la bomba adecuadamente.

El caudal de retorno se puede expresar como:

$$Q\min_{dis} = \frac{(Apist - Avást) \bullet L}{t_{ret}}$$

5) Partiendo de lo anterior, ahora es necesario calcular el caudal para diferentes configuraciones de vástagos, los cuales serán analizados como función del diámetro de pistón, es decir, para cada diámetro de pistón calculado en función de su caudal de avance requerido, se calcularán los vástagos, siendo estos equivalentes a la mitad o la tercera parte del diámetro de pistón; estos mostrarán el valor de caudal de retorno requerido para cada uno. Para una mayor claridad esto se puede observar en la tabla 20.

6) De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla, se puede observar que para un diámetro de pistón y su correspondiente caudal corresponde un valor de diámetro de vástago (criterio de diseño) con su respectivo caudal. Para seleccionar el modelo más adecuado, es necesario recordar que el flujo tiene por consecuencia del número de cilindros un divisor de caudal. Este divisor de caudal es el que permite obtener el valor real que debe suministrar la bomba y es el valor que se deberá tener en cuenta. Para esto simplemente se puede utilizar la fórmula para el divisor de caudal planteada en el comienzo de esta sección.

Para realizar este procedimiento basta con tomar un valor deseado de selección del actuador, teniendo en cuenta las recomendaciones que anteriormente se plantearon para la selección del mismo.

6) Para el caso en cuestión, observando la línea resaltada en azul en la tabla 27, se asume un diámetro de pistón para el cual fue calculado su respectivo caudal, y además se incluye los posibles caudales de retorno para las 2 diferentes posibilidades de selección de vástago con el correspondiente caudal. Para el caso propuesto se asumió un diámetro pistón igual a dos veces el diámetro del vástago, los valores son:

$$\boxed{\phi_{pistón} = 0.075m}$$

$$\boxed{\phi_{vástago} = 0.0375m}$$

Con estos valores definidos la presión mínima de diseño acorde a la tabla 20 es:

$$\boxed{P\min_{dis} = 4615789{,}601\text{Pa}}$$

Es importante que se definan los valores fijos y los variables, así se puede tener una mejor organización de la información sobre los elementos que se vayan a cambiar. Lo anterior se puede asumir, dependiendo si se ha encontrado el cilindro aproximado a los requerimientos asegurando que se verifiquen los resultados estimados.

Tabla 20. Relación de caudales para diferentes diámetros de pistón y de vástago

Φpistón (m)	Qav min dis(m^3/s)	Qav min dis(L/min)	Φvástago(m) =Φpistón/2	Qret min dis(m^3/s)	Qret min dis(L/min)	Φvástago(m) =Φpistón/3	Qret min dis(m^3/s)	Qret min dis(L/min)
0,035	0,000074	4,43	0,0175	5,53215E-05	3,32	0,011666667	6,55662E-05	3,93
0,04	0,000096	5,78	0,02	7,22566E-05	4,34	0,013333333	8,56375E-05	5,14
0,045	0,000122	7,32	0,0225	9,14498E-05	5,49	0,015	0,000108385	6,50
0,05	0,000151	9,03	0,025	0,000112901	6,77	0,016666667	0,000133809	8,03
0,055	0,000182	10,93	0,0275	0,00013661	8,20	0,018333333	0,000161908	9,71
0,06	0,000217	13,01	0,03	0,000162577	9,75	0,02	0,000192684	11,56
0,065	0,000254	15,26	0,0325	0,000190803	11,45	0,021666667	0,000226136	13,57
0,07	0,000295	17,70	0,035	0,000221286	13,28	0,023333333	0,000262265	15,74
0,075	0,000339	20,32	0,0375	0,000254027	15,24	0,025	0,000301069	18,06
0,08	0,000385	23,12	0,04	0,000289027	17,34	0,026666667	0,00034255	20,55
0,085	0,000435	26,10	0,0425	0,000326284	19,58	0,028333333	0,000386707	23,20
0,09	0,000488	29,26	0,045	0,000365799	21,95	0,03	0,00043354	26,01
0,095	0,000543	32,61	0,0475	0,000407573	24,45	0,031666667	0,000483049	28,98
0,1	0,000602	36,13	0,05	0,000451604	27,10	0,033333333	0,000535234	32,11
0,105	0,000664	39,83	0,0525	0,000497893	29,87	0,035	0,000590096	35,41
0,11	0,000729	43,72	0,055	0,000546441	32,79	0,036666667	0,000647634	38,86
0,115	0,000796	47,78	0,0575	0,000597246	35,83	0,038333333	0,000707847	42,47
0,12	0,000867	52,02	0,06	0,00065031	39,02	0,04	0,000770737	46,24
0,125	0,000941	56,45	0,0625	0,000705631	42,34	0,041666667	0,000836304	50,18
0,13	0,001018	61,06	0,065	0,000763211	45,79	0,043333333	0,000904546	54,27
0,135	0,001097	65,84	0,0675	0,000823048	49,38	0,045	0,000975465	58,53
0,14	0,001180	70,81	0,07	0,000885144	53,11	0,046666667	0,001049059	62,94

Diseño del autor

Observando en los catálogos proporcionados por los fabricantes es posible encontrar los siguientes datos:

- El diámetro del pistón.
- El diámetro del vástago.
- El diámetro interno de conectores.
- La longitud de carrera.
- La presión de operación máxima.

En condiciones de diseño es importante intentar seleccionar un cilindro previamente diseñado, de tal forma que no se tenga que esbozar y construir un actuador nuevo, lo cual incrementaría los costos de producción del componente.

NOTA: Para el ejercicio se va a asumir que se ha encontrado un cilindro con los requerimientos de operación que se necesitan, también que cumple con las condiciones de forma y tamaño necesitados.

7) Habiendo seleccionado el cilindro, ahora se puede proceder a calcular el caudal resultante que debe ser proveído por la bomba (Q_7). Para esto se puede utilizar la ecuación que fue mostrada en la sección 13.2.6 y la figura 118.

7) Calculando el caudal que ingresa en cada cilindro se tiene:

$$\boxed{Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 20.32 L/\min}$$

Para la sección intermedia se calcula:

$$Q_5 = Q_6 = 2 \bullet Q_1$$

$$Q_5 = Q_6 = 2 \bullet 20.32 L/\min$$

$$\boxed{Q_5 = Q_6 = 40.64 L/\min}$$

Para el calcular el caudal que debe ser provisto por la bomba se tiene:

$$Q_7 = 2 \bullet Q_5$$

$$Q_7 = 2 \bullet 40.64 L/\min$$

$$\boxed{Q_7 = 81.28 L/\min}$$

13.2.7 Comportamiento del fluido hidráulico y caída de presión general en el sistema. Ahora sin tener en cuenta por ahora las pérdidas menores generadas en el sistema se realizará un análisis simple para conocer el comportamiento del flujo dentro de las tuberías, en esta parte se mostrará si el flujo tiene comportamiento laminar o turbulento, para calcular la caída de presión de una forma aproximada.

6.4.4.2.8 Selección del fluido hidráulico. El fluido hidráulico es el medio por el cual la presión producida por la bomba, es transmitida por el mismo para producir una fuerza sobre una superficie específica, ya sea para mover un cilindro, o para generar la energía necesaria para mover un motor hidráulico.

Los fluidos hidráulicos deben satisfacer los siguientes requerimientos para operar dentro de una aeronave:

- Bajo punto de congelamiento.

- Mínimo cambio de la viscosidad con respecto a la temperatura.

- Buena estabilidad a la corrosión y a la oxidación.

- Esfuerzo estable.

- Alto grado de limpieza.

- Resistencia al fuego.

- Propiedades de buena anti-espuma.

- Buena estabilidad a bajas y altas temperaturas.

Además de esto, existen algunos requerimientos adicionales que deben cumplir, esto dependerá exclusivamente de las especificaciones para el tipo de fluido ó para la aplicación requerida.

Los sistemas hidráulicos se caracterizan por su alto periodo de operación sin chequeos, solo algunos procedimientos de servicio que se realizan son requeridos. Entre estos servicios se encuentran el cambio de fluido o el sangrado de aire del sistema. Algunos de las especificaciones de fluidos más utilizadas en la actualidad son los siguientes:

- **MIL-H-5606.** Principalmente utilizado en la industria naval, tiene un rango de operación entre –65°F y 275°F. Consiste en un producto derivado de petróleo con aditivos que se utilizan para mejorar la viscosidad e inhibir la oxidación.

- **MIL-H-83282.** (Muy utilizado en aviones militares). Es una base de hidro-carbono sintética que junto con aditivos tiene buenas propiedades de viscosidad, inhibición de oxidación y corrosión. Tiene un rango de operación entre -40°F y +275°F. es un fluido resistente al calor lo cual le generan características de inflamabilidad muy bajas, además en caso de presentarse ignición, el fuego se extingue por sí mismo tan solo retirando la llama o la fuente de calor. Se puede combinar con el fluido MIL-H-5606 sin ningún tipo de problema.

- **MIL-H-81019.** Este es un fluido hidráulico utilizado en ultra bajas temperaturas, se utiliza en ambientes operacionales donde la baja temperatura es predominante. Es un producto derivado del petróleo el cual tiene importantes características de viscosidad, anti-oxidante e inhibidor de corrosión. Tiene un rango de operación entre –90°F y +120ºF.

Estos fluidos son utilizados principalmente en pilotos automáticos, frenos, mecanismos de control y sistemas servo - controlados.

Los fluidos hidráulicos minerales (MIL-PRF-5606, MIL-PRF-6083) son compatibles y mezclables con los fluídos hidráulicos de hidrocarbón (MILPRF-83282, MIL-PRF-87257 and MIL-PRF-46170). Por el contrario, los anteriores no son compatibles con los fluidos hidráulicos de fosfato de ester por tanto no deben ser mezclados.

Los últimos avances tecnológicos muestran un creciente incremento en la operación interna de los sistemas hidráulicos, llegando a trabajar a presiones mayores a los 3000 psi., bajo condiciones de temperatura extremas (-50^{o}C hasta + 120^{o}C) lo cual ha generado un estudio más avanzado para el desarrollo de fluidos con una alta viscosidad.

Muchos de los fluidos utilizados actualmente son fluidos sintéticos que se caracterizan por ser no inflamables, estos han reemplazado los fluidos de derivados del petróleo tanto en la industria aeronáutica civil, como en la industria aérea militar. Algunas especificaciones para fluidos hidráulicos se pueden encontrar en el anexo I.

8) Es necesario identificar la siguiente información para comenzar con el análisis:

- Viscosidad cinemática del fluido hidráulico.

- Diámetro de la tubería flexible. Si es posible es importante mencionar que la tubería flexible debe garantizar soportar las máximas temperaturas posibles, adicional a esto debe ser liviana y resistente mecánicamente.

8) Par el ejercicio propuesto se tomarán los siguientes datos.

- El fluido utilizado para este caso será el AEROSHELL 41, el cual está bajo los requerimientos de la norma MIL-H-5056, este tipo de fluido hidráulico tiene buenas ventajas con respecto a otras especificaciones de fluidos, lo más importante es que su variación de viscosidad será menor con respecto a la temperatura, comparándola con otras especificaciones. Esto se puede observa en la sección 6.4.4.3 y en el anexo H. Este fluido tiene las siguientes características a 15 ºC:

- Viscosidad cinemática: 24 mm^2/s.

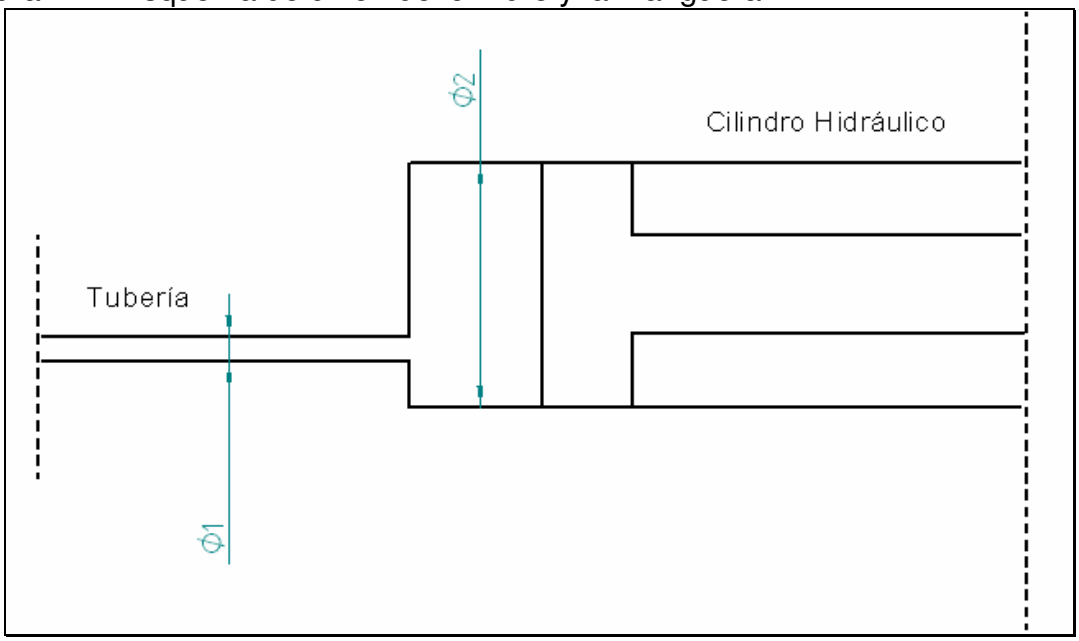
- El diámetro de interno de la tubería será de 0.02 m. (este diámetro estará en función del tipo de unión que se tenga tanto a la válvula como a los respectivos actuadores, ya que de sus uniones dependerá el diámetro útil interno seleccionado.

9) Ahora se aplicará el principio de la ecuación de la continuidad, para medir el flujo dentro de la tubería, teniendo en cuenta el caso en donde el flujo por su caudal tendrá la mayor velocidad, es decir, para el avance.
Se asumirá lo siguiente:

- La superficie interna de la tubería será lisa.

- Por ser un líquido hidráulico el flujo es tomado como incompresible, los efectos de compresibilidad aplicados al fluido son insignificantes, esto genera que se asuma la densidad del flujo como constante en cualquier punto.

Figura 122. Esquema de unión del cilindro y la manguera



Diseño del autor

Para calcular la velocidad del flujo en la tubería es necesario referirse al esquema de la figura 122.

Según lo anterior y tomando en cuenta la ecuación de la continuidad para flujo incompresible definida para el esquema propuesto se tiene:

$$\boxed{Q_1 = Q_2 = cons\tan te}$$

$$\boxed{\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = cons\tan te}$$

Como se dijo anteriormente el flujo se asume incompresible, por lo cual la densidad se asume constante y se cancela de la ecuación anterior, obteniendo:

$$\boxed{\rho_1 = \rho_2 = cons\tan te}$$

$$\cancel{\rho_1} A_1 V_1 = \cancel{\rho_2} A_2 V_2$$

La ecuación de continuidad para un fluido incompresible se resume a:

$$\boxed{A_1 V_1 = A_2 V_2}$$

Con esta ecuación conocida es posible ahora calcular el valor de la velocidad del flujo dentro de la tubería dependiendo de las dimensiones internas que este misma posea, así despejando la velocidad en 1 de la ecuación y simplificando se tiene:

$$V_1 = \frac{A_2 V_2}{A_1}$$

$$V_1 = \frac{\frac{\pi\phi_2^2}{4}\frac{L}{t_{avance}}}{\left(\frac{\pi\phi_1^2}{4}\right)}$$

$$\boxed{V_1 = \frac{\phi_2^2 \frac{L}{t_{avance}}}{\phi_1^2}}$$

9) Reemplazando en la ecuación con los valores previamente calculados, es posible determinar la velocidad del fluido hidráulico dentro de la tubería flexible que está conectada al cilindro, así:

$$V_1 = \frac{4(0.075m)^2\left(\frac{0.23m}{5s}\right)}{\pi(0.02m)^2}$$

$$\boxed{V_1 = 0.8236\,{}^{m}\!/_{s}}$$

10) Para el cálculo de las velocidades en las secciones restantes donde el perfil de velocidad es producto del divisor de caudal, al ser las líneas flexibles de sección transversal constantes, simplemente el flujo aumentará proporcionalmente en el aumento de su velocidad. Para hacer esto más claro se puede entender como se muestra a continuación:

Para la sección intermedia se tiene:

$$Q_5 = Q_6 = 2 \bullet Q_1$$

$$A_5V_5 = A_6V_6 = 2 \bullet A_1V_1$$

Con el área constante se tiene:

$$\boxed{V_5 = V_6 = 2 \bullet V_1}$$

Lo anterior aplica igualmente para la sección de flujo proveída por la bomba se tiene:

$$Q_7 = 2 \bullet Q_5$$

$$A_7 V_7 = 2 \bullet A_5 V_5$$

$$\boxed{V_7 = 2 \bullet V_5}$$

10) Para el caso en las demás secciones se puede aplicar:

Para la sección intermedia:

$$V_5 = V_6 = 2 \bullet 0.8236 \, m/s$$

$$\boxed{V_5 = V_6 = 1.6432 \, m/s}$$

Para la velocidad requerida por la bomba:

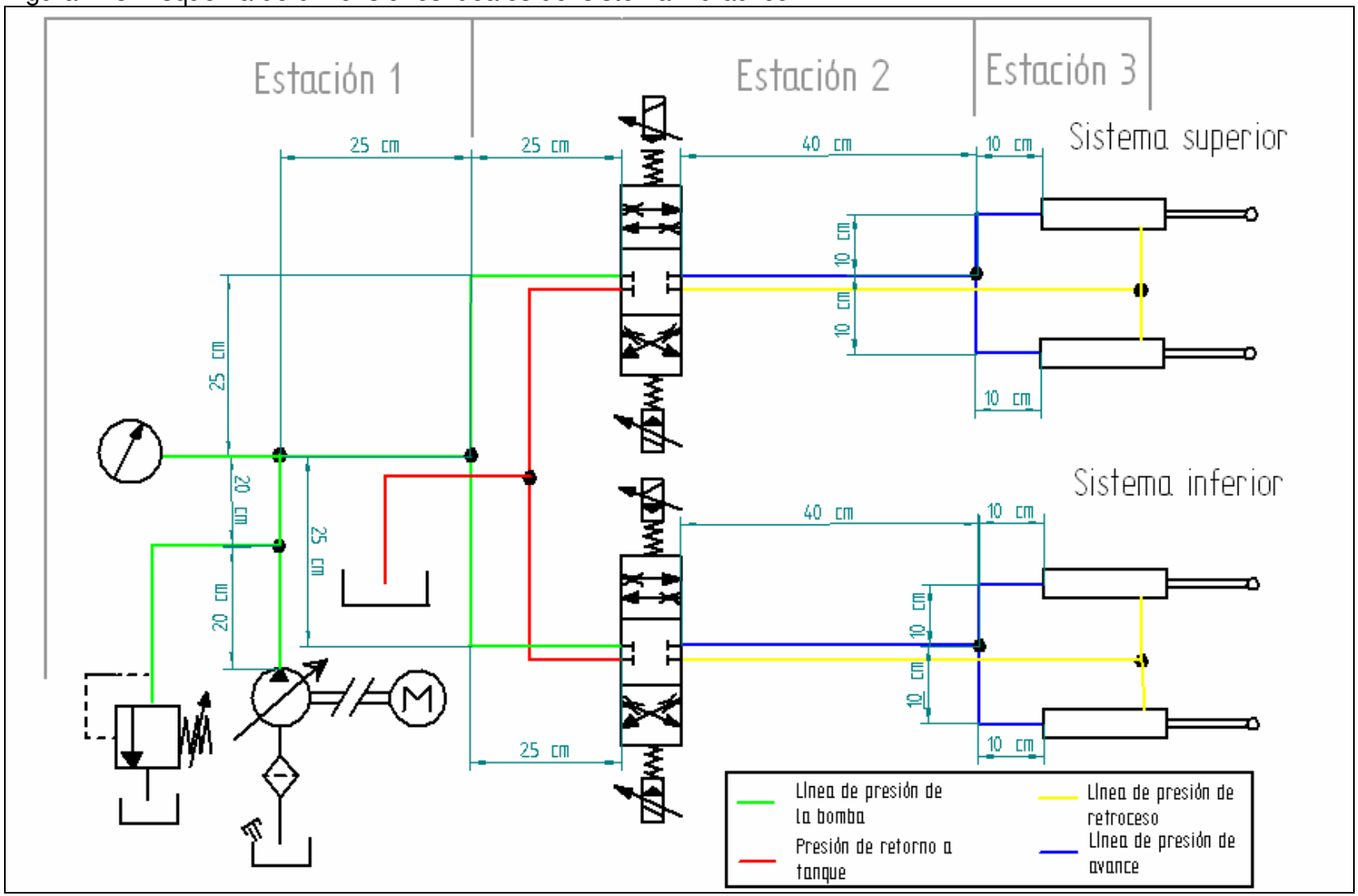
$$V_7 = 2 \bullet 1.6432 \, m/s$$

$$\boxed{V_7 = 3.2944 \, m/s}$$

11) Ahora se debe mostrar un esquema en donde se deben especificar las longitudes respectivas de cada sección. Este esquema dependerá exclusivamente de las dimensiones y del posicionamiento de cada uno de los componentes dentro de la aeronave. Para un primer análisis se debe tomar una longitud horizontal aproximada que no tenga en cuenta desviaciones de las líneas hidráulicas, cualquier variación debe ser estudiada para un análisis detallado del sistema.

11) Para el caso de estudio se debe revisar el esquema de la figura 123.

Figura 123. Esquema de dimensiones ideales del sistema hidráulico



Diseño del autor

12) Ahora se calculará un valor útil en el estudio del comportamiento de un fluido dentro de una tubería, el número de Reynolds. Este valor será evaluado para cada estación dependiendo de la velocidad que se tenga en cada una. El mayor valor de número de Reynolds se obtendrá en la sección de la tubería flexible, entre la válvula y la bomba (estación 1), en donde por la magnitud del caudal, la velocidad del flujo será máxima ya que para todo el sistema se asumieron los diámetros de las mangueras constantes. Se recomienda realizar una tabla con la cual se pueda evaluar la magnitud del número de Reynolds, para más adelante calcular el valor de caída de presión resultante.

$$\mathrm{Re} = \frac{V\phi}{\upsilon}$$

12) Calculando en Reynolds con estos valores se obtiene lo mostrado en la tabla 21, para esto se requiere utiliza el valor de la viscosidad cinemática y el diámetro de las tuberías, de esta manera se tiene para cada uno de las diferentes secciones lo siguiente:

Tabla 21. Número de Reynolds para las diferentes estaciones del sistema hidráulico

Estación	velocidad(m/s)	Re
1	3,2944	2745,3
2	1,6472	1372,7
3	0,8236	686,3

Diseño del autor

Como se puede apreciar, todos los valores tienen un perfil laminar (Re < 2300) a lo largo de la tubería, con la excepción de la estación 1 en donde se tiene flujo transicional. Para este último caso se recomienda calcular un valor de diámetro menor para obtener un valor de flujo en el área de análisis laminar (la viscosidad cinemática y la velocidad (caudal) son constantes), esto se recomienda principalmente para que la caída de presión interna por efecto de la fricción del fluido sea la mínima posible.

13) A continuación se debe realizar la adecuación del diámetro para las tuberías de la sección 1, ya que estas son las que se encuentran por fuera de la zona de operación laminar. Para esto se aplica la ecuación de Número de Reynolds y se despeja el diámetro, así:

$$\boxed{\phi = \frac{\mathrm{Re} \bullet \upsilon}{V}}$$

$$\mathrm{Re} = 2300$$

13) Para el caso en cuestión:

$$\phi = \frac{2300 \bullet 24 \, mm^2/s \bullet 1 m^2/(1000 mm)^2}{3.2944 \, m/s}$$

$$\boxed{\phi = 0{,}0167\mathrm{m}}$$

Redondeando a un número más aproximado para un diámetro de interno de tubería se tiene:

$$\boxed{\phi = 0{,}015\mathrm{m}}$$

Recalculando el número de Reynolds se tiene:

$$\mathrm{Re} = \frac{0.015 m \bullet 3.2944 \, m/s}{24 \, mm^2/s \bullet 1 m^2/(1000 mm)^2}$$

$$\boxed{\mathrm{Re} = 2059}$$

14) Seguidamente, ahora se puede calcular el valor de caída de presión para el sistema en general. Para este caso, como se observó anteriormente el flujo es laminar (no se tiene en cuenta el efecto de la fricción) y los Números de Reynolds para sus respectivas secciones han sido determinados. Tomando en cuenta lo anterior, se puede medir la caída de presión con la fórmula planteada en la sección 6.4.4.3 para determinar el factor de fricción y así determinar la pérdida de presión. Se puede de la misma forma hacer una tabla para cada una de las secciones.

Para flujo laminar se recuerda:

$$\Delta P = f \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

14) Para el caso propuesto se puede observar la tabla 22.

Tabla 22. Caída de presión de las líneas de hidráulicas

Estación	velocidad(m/s)	Re	f	L (m)	h_l(m)
1(adaptado)	3,2944	2059,0	0,031083	0,65	0,5594
2	1,6472	1372,7	0,046625	1,8	0,5809
3	0,8236	686,3	0,093249	0,8	0,1721

Diseño del autor

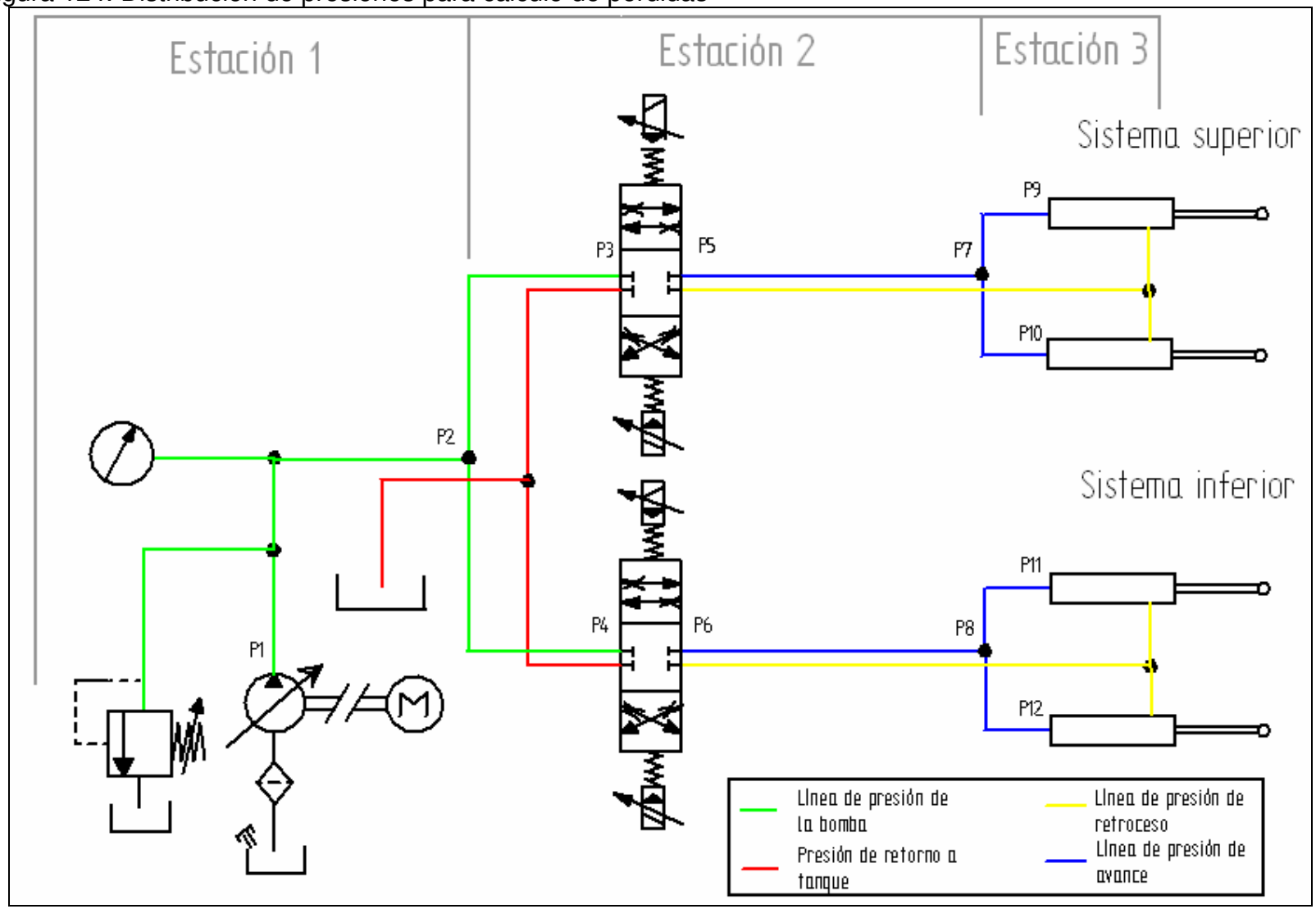
15) Con lo anterior es posible determinar la caída de presión para cada sección y de esta manera se puede calcular la pérdida de presión aproximada en todo el sistema, utilizando la ecuación de la energía para análisis de fluidos dentro de tuberías.

Primero mediante un esquema se deben mostrar los puntos entre los cuales se realizará el análisis de diferencia de presiones. Los valores de pérdida para cada línea fueron calculados previamente y ahora serán medidos en términos de presión para calcular sus magnitudes en unidades adecuadas.

15) Para observar el esquema, remitirse a la figura 124.

16) Conociendo los siguientes valores para el fluido hidráulico, se puede medir la caída de presión en el sistema evaluando entre los puntos locales la magnitud de cada una.

Figura 124. Distribución de presiones para cálculo de pérdidas



Diseño del autor

- Para esta parte se asumirá que no hay variación de la altura del fluido (presión hidrostática), es decir que el flujo será analizado a lo largo de una tubería completamente horizontal.

- No se asumirán las pérdidas por conexiones, ni por el paso a través de las diferentes uniones en T, ni de entrada y salida de válvulas (P3, P4, P5 y P6).

Las constantes para este caso son:

γ = 0.874N/m^2@15ºC (para aeroSHELL 41).

Z_n = Constante.

Se debe iniciar el análisis para la sección en donde se conoce la presión, es decir, en donde se encuentra la presión que será requerida por el pistón para moverse. Calculando se obtiene la presión en el punto inmediatamente anterior de análisis. Para el caso propuesto es posible realizar el procedimiento para cada sección por medio de una tabla, despejando la presión requerida en el punto que se necesite, así para un caso general se tiene:

$$P_1 = \gamma\left(\frac{P_2}{\gamma} + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}\right) + (Z_2 - Z_1) + h_l\right)$$

Como la presión hidrostática se asume constante se tiene entonces:

$$\boxed{P_1 = \gamma\left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{1}{2g}\left(V_2^2 - V_1^2\right) + h_l\right)}$$

De esta manera se puede calcular repetitivamente la presión correspondiente a cada punto de presión hasta que se calcule el valor requerido que debe ser suministrado por la bomba.

16) Para el caso propuesto se debe revisar la tabla 23 para resultados.

Tabla 23. Cálculo de las caídas de presión en el sistema

#	Punto de análisis	Presión punto de análisis (Pa)	hl(m)	velocidad sección (m/s)	Pres#(Pa)	Pres#(psi)
1	P9 = P10 = P11 = P12 = Ppist	4615789,601	0,1721	0,8236	4615789,7506	669,46353
2	P8 = P7 = Pres(#-1)	4615789,751	0,5809	1,6472	4615790,2555	669,46360
3	P2 = Pres(#-1)	4615790,256	0,5809	1,6472	4615790,7604	669,46368
4	P1 = Pres(#-1) =Pbomba	4615790,760	0,5594	3,2944	4615791,2466	669,46375

Diseño del autor

17) De esta forma se puede tener una idea de los requerimientos de la bomba que se necesitarán, así se puede establecer un rango de selección que debe al menos cumplir con la presión y caudal mínimo de diseño.

17) La bomba debe cumplir aproximadamente los siguientes requerimientos:

$$\boxed{Q_{dis} = 81.28 L/\min}$$

$$\boxed{P\min_{dis} = 4615791{,}2466 \text{Pa}}$$

13.2.8 Sistema de emergencia. Cualquier sistema hidráulico que pertenezca a una aeronave, debe garantizar que en caso de fallo, tenga un mecanismo de re - posicionamiento de los actuadores de manera tal que siempre se retorne a la posición inicial con seguridad.

- En caso de fallo del sistema de presurización de las cámaras, se tendrá un enorme problema, ya que los cilindros, a pesar de estar diseñados para soportar una sobre carga del componente, no soportarán la presión ejercida por la tobera. Es por esto que se deben observar las siguientes posibilidades:

- Si el sistema de la aeronave tiene únicamente un solo motor: Los problemas serán muy altos, ya que no existiría una fuente que pueda suplir la presión

requerida por la cámara, así que debe se diseñar un mecanismo mecánico que pueda estáticamente controlar esto.

- Si el sistema de la aeronave tiene dos motores: Sería viable asegurar que la cámara de presurización esté conectada al otro motor, esto permitirá que en caso de presentarse un problema con cualquiera de los dos sistemas, se aseguraría que el aire sangrado de los motores puede llegar a cualquiera de las dos toberas.

- Para el caso de fallo de los cilindros, como se dijo anteriormente, el sistema estará diseñado bajo la filosofía de falla segura. Con este criterio en caso de fallo de un cilindro, automáticamente el otro estará en la capacidad de soportar la sobre carga para la cual fueron diseñados. Para este caso, es importante que uno de los cilindros opuestos sea también desactivado, como para que el sistema quede mejor equilibrado.

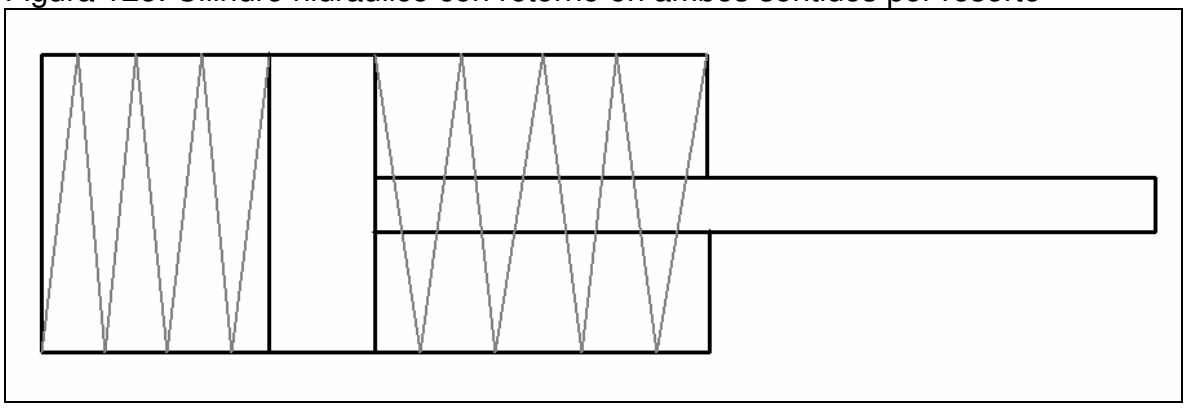
- En caso de fallo del sistema hidráulico, el cilindro debe estar diseñado con el fin de que retorne a la posición normal automáticamente. Esto puede ser llevado a cabo por medio de dos opciones:

- La primera opción puede ser llevada a cabo asegurando la conexión de las hidráulicas de los actuadores a un acumulador que esté en la capacidad de presurizar las líneas al punto requerido, teniendo en cuenta que la válvula proporcional debe estar desactivada, y además, que la cantidad de fluido liberada, debe quedar distribuida uniformemente dentro de las cavidades del cilindro para que lo posicionen en régimen de cero vectorización.

Este sistema tiene las desventajas que incrementará el peso del sistema, al aumentar el número de elementos internos que lo conforman, esto desde ningún punto de vista sería adecuado, ya que este tipo de sistemas se deben caracterizar por su simplicidad y efectividad. Además de lo anterior, sería de cierta manera más complicado sincronizar el sistema para que actúe adecuadamente.

- La segunda opción tiene que ver con el diseño del cilindro hidráulico, ya que para este caso sería muy viable utilizar un sistema interno de retorno por resorte (ver figura 125), que en la caso de presentarse una falla se pueda automáticamente posicionar el cilindro a su posición normal. Para este caso se puede observar el esquema de la figura para observar el tipo de actuador requerido.

Figura 125. Cilindro hidráulico con retorno en ambos sentidos por resorte



Diseño del autor

Observando el esquema se debe asegurar para el cilindro que la fuerza ejercida por los dos resortes debe ser de tal magnitud que se asegure que le cilindro se encuentre exactamente en su posición media.

13.2.9 Sistema en general. Finalmente, ahora se pueden plantear los requerimientos básicos del sistema hidráulico, teniendo en cuenta los parámetros que fueron analizados anteriormente De esta manera es más sencillo organizar los elementos requeridos, así:

- En general se utilizará un solo sistema hidráulico el cual proveerá alimentación a las partes superior e inferior con la misma bomba.

- Se utilizarán 4 cilindros hidráulicos de retorno en ambos sentidos por resorte.

- Se deben utilizar dos válvulas proporcionales que invertirán la dirección del flujo para cada uno de los sub – sistemas superior e inferior. Estas válvulas proporcionales deben regular el caudal de retorno para cada sub – sistema según el régimen de operación y vectorización requerido.

- Se utilizarán tuberías flexibles que deben trabajar a altas temperaturas, son tuberías que para el caso propuesto operan a cargas de presión medias (Presión menor a 1500 psi). Deben ser tuberías que para el caso en que el flujo sea turbulento, deben garantizar el mínimo factor de fricción para disminuir las pérdidas internas del sistema. El diámetro de cada una ha sido previamente evaluado.

- Es necesario utilizar una válvula de seguridad para todo el sistema el cual funcionará en caso de que se presente una sobre presión generada internamente, esto se hace principalmente con el fin de garantizar que la bomba pueda operar de forma adecuada sin que se le genere ningún daño.

- Es posible utilizar un instrumento medidor de presión, con el cual se puede chequear, para efectos de mantenimiento, la presión con la cual está operando el sistema.

- Se necesita ubicar los diferentes detectores magnéticos con los cuales se determinará las posiciones de vectorización.

- Las diferentes dimensiones han sido determinadas, así mismo, se mostraron las uniones y las longitudes estimadas para cada estación.

14. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROTOTIPO

Con respecto al análisis de costos del mecanismo, es muy poco lo que se puede mencionar, debido a que el sistema de actuación lo conforman una serie de componentes, que para este caso hacen parte de otros sub - sistemas, como por ejemplo, los actuadores y las láminas estructurales.

Lo que concierne al análisis de costos según los elementos que hacen parte de la actuación son los elementos de pivote y el elemento de enganche del actuador con la tobera. Para el caso de elementos de pivote, se ha seleccionado el caso más óptimo analizado anteriormente (caso tipo 4), el cual se compone de un pivote en la zona central de unión de la tobera con el post - quemador.

Para este caso el análisis de costos se basará en los dos elementos mencionados: un pivote central de movimiento y un dispositivo de unión Tobera/ Actuador.

1. Pivote Central de Movimiento.

El pivote central de movimiento se ha determinado después de una selección de diferentes propuestas de catálogos de fabricantes se ha tomado un pivote propuesta por el fabricante TNK con una especificación y referencia Pívot Bearing, P/N 28649-E639. Por catalogo la pieza se encuentra en un valor de 2630 US$.

2. Dispositivo de unión

Este Dispositivo de unión de la tobera con respecto al actuador es un elemento de forma de orquilla, que según el criterio del análisis esta pieza debe construirse por el fabricante de la tobera ya, que este tipo de elemento no se encuentra por catalogo de fabricantes, debido a esto no se tiene un precio de la unidad.

El análisis de los costos del sistema hidráulico esta basado en el sistema adaptado para el caso más óptimo. Este análisis se realiza para todo el sistema en general. Se han tenido en cuenta todos los componentes nombrados anteriormente en el capitulo referente al sistema hidráulico.

Según el análisis para el sistema de actuación principal con todos los componentes especificados en el capítulo se tiene el siguiente aproximado:

- Sistema Hidráulico Principal = 8500 US$ – 9000 US$

Los valores de los sistemas se han tomado en base a promedios de sistemas hidráulicos especificados en varios prototipos de aeronaves y además por conocimiento y experiencia de diseño.

15. CONCLUSIONES

En la planeación y ejecución del trabajo de grado se realizó el diseño metodológico de la tobera de empuje vectorial teniendo como criterio de trabajo, el desarrollo de un método que permitiera analizar y estudiar los temas principales durante la fase de diseño preliminar, de esta forma se propuso un esquema con el cual a partir de un calculo termogasodinámico inicial se estudiaron diversos métodos de vectorización y se recomendaron los mas eficientes, con lo cual se tiene una juicio mas viable para realizar un diseño detallado.

Como se observó durante el diseño preliminar de la tobera para el régimen supersónico no se obtuvo ningún inconveniente de mayor problemática, esta tobera ofreció una gran eficiencia y aproximación a los valores que fueron calculados con el programa de análisis de fluidos FLUENT, lo cual comprobó la efectividad del procedimiento metodológico propuesto anteriormente.

Por otro lado, en el régimen subsónico se debió desarrollar una metodología que permitiera que las condiciones operativas de ambos regimenes se cumplieran de tal forma que se obtuviera el mayor rendimiento posible. En este análisis, fácilmente se notó la dificultad para optimizar la tobera teniendo en cuenta los parámetros requeridos de diseño de la tobera de laval.

En cuanto al comportamiento del flujo dentro de la tobera, se logró estudiar mediante el programa de simulación computacional de fluidos CFD, arrojando y comprobando los resultados realizados manualmente mediante los cálculos termogasodinámicos como lo son la presión y Número de Mach, mostrando un margen de error alrededor de 0.002%. Este análisis se realizó para los dos regimenes de operación.

Los parámetros de funcionamiento definen las áreas características de cada una de las secciones de este diseño, por tanto el dimensionamiento geométrico es una variable dependiente de los procesos termogasodinámicos, así como también, la búsqueda de un perfil que cumpla con estos requisitos se evidencia en la combinación de una tobera cuadrada y una con bordes suavizados para obtener un diseño óptimo que se desempeñe correctamente ante los distintos tipos de esfuerzos y el ambiente de operación.

En base a lo anterior, los estudios termogasodinámicos demostraron los principales defectos de la tobera y la necesidad de ser mejorada en sus contornos para que pudiera cumplir efectivamente con su trabajo, además se mostró que para el régimen subsónico la expansión incompleta de la tobera produjo enormes pérdidas, lo cual origina que las características de utilización de la energía disponible no fueran adecuadas para esta operación.

Otro hecho resaltante que influye de sobre manera en el comportamiento del componente fue su perfilamiento, el cual, es parte primordial en el desempeño que tiene el flujo internamente. Como se observó, para el análisis ideal subsónico, aún el gas no se había expandido completamente, y aunque cumple con los requerimientos para análisis de tobera convergente, tiene también una gran pérdida por causa del tubo recto con el cual interactúa.

En el análisis supersónico, la geometría de este perfilamiento ejerce una fuerte influencia sobre el desempeño del componente, aunque se trató manualmente de perfilar la tobera para que se tuviera unos resultados más óptimos en el análisis planteado, se produjeron pequeños cambios de presión "burbujas", que fueron reducidos en su máxima proporción posible, con el fin de que se obtuvieran valores más cercanos a los reales, o de cierta manera, para que el análisis fuera el más acertado posible.

Las "burbujas" de presión se producen por efecto del perfilamiento, ya que en estos casos el flujo no se está expandiendo adecuadamente con un perfil constante y gradual de cambio de velocidad a lo largo de la tobera. Esto es causado principalmente por la geometría de los contornos internos de la tobera, ya que estos no permiten la expansión adecuada del fluido.

Teniendo en cuenta los resultados de vectorización que se analizaron gráficamente con respecto a las distribuciones internas de presión estática y Número de Mach, se pudo observar la notable influencia del tipo de vectorización utilizado en el comportamiento interno de cada uno de los parámetros. De esta forma, se determinó que el mejor método de vectorización, acorde a estos resultados, es el tipo 4 (movimiento total externo de la tobera de cajón pivotado en el medio), ya que fue el que presentó las menores variaciones en sus parámetros internos.

Para el caso tipo 3 (movimiento total externo de la tobera) se demostró también que posee un perfil de parámetros relativamente constante, sin embargo, se

encontraron variaciones notables que le disminuyeron su eficiencia interna con respecto al caso tipo 4.

Es así, que se planteó la solución parcial para la selección del tipo de método más efectivo para vectorizar el flujo de una tobera. Con este tipo de método se observaron cambios mínimos internamente, lo cual generará una mayor eficiencia y rendimiento del flujo cuando se trate de proveer el empuje de vectorización requerido.

Lo anterior también quedó demostrado para el caso de régimen subsónico, en donde la influencia de la vectorización juega un papel muy importante en la producción de ondas de choque en el tubo recto, debido a los cambios bruscos en la dirección del flujo, y además, por la energía que aún se encuentra disponible internamente en la tobera para ser expandida. Para este caso crítico evaluado, en donde los parámetros internos de la tobera convergente trabajaron bajo las condiciones máximas permisibles de operación, se encontró que el método de vectorización tipo 4 también fue el más efectivo, ya que a pesar de encontrarse la tobera sin realizar la expansión del gas completamente, no generó ondas de choque internas ni variaciones importantes en los parámetros dentro de la misma.

Según esto, es posible concluir que para el caso en el que se requiera realizar la vectorización de un flujo dentro de una tobera, la manera más efectiva de hacerlo es por medio de la variación completa del ángulo con respecto a la horizontal de la misma, sin que se altere la geometría interna, es decir, se debe vectorizar la tobera, manteniendo constante la posición de las láminas internas con el fin de mantener los parámetros casi constantes dentro de la misma.

De acuerdo a lo anterior, se puede garantizar que el método de cálculo termogasodinámico básico propuesto al inicio del estudio es aplicable para los casos de vectorización tipo 3 o tipo 4, los cuales como se busca en requerimientos de diseño resultan ser los más efectivos para el objetivo de operación propuesto.

Además de lo anterior, es necesario recalcar que aunque los parámetros permanecen casi constantes a lo largo y en especial en la salida de la tobera para los casos recomendados, van a existir pérdidas importantes internamente causadas por la fricción, el intercambio de calor, las pérdidas de flujo y turbulencia que deben ser medidas para determinar la magnitud real de los diferentes parámetros y obtener una aproximación aún más válida.

Después del análisis realizado a los casos propuestos de vectorización posibles, desde el punto de vista de rendimiento de actuación, de la cantidad de elementos actuadores y la facilidad de movimiento e interacción del actuador con respecto a la vectorización de la tobera, los casos que presentaron los mejores resultados fueron el caso tipo 2 y el caso tipo 4.

Estos dos casos presentan una excelente eficiencia de vectorización, debido a que el vector resultante paralelo al flujo se vectoriza a los grados que necesite la tobera, además de esto, el número de componentes necesarios para la vectorización son menores con respecto a los otros dos sistemas, ya que este solamente posee dos actuadores para todo el conjunto. Otra ventaja que poseen estos dos sistemas es que el mecanismo es bastante sencillo y por ende permite que el manejo o manipulación de estos, no sea complicado.

El caso tipo 2 como se mencionaba anteriormente, es un sistema que al evaluarse geométricamente, tiene que el vector de salida del flujo al estar vectorizado mostró como resultado, que el ángulo de salida del vector era igual al requerido, sin embargo, las variaciones internas en el sistema son muy grandes. Por el otro lado, presenta ventajas en el control o manejo del sistema ya que como este tiene actuadores únicamente en la parte divergente su control es mucho mas simple.

Desde el punto de vista de número de elementos, estos se ven reducidos ya que el punto de pivote es solamente uno por lámina en la sección divergente, y esto en términos de peso, se muestra en una reducción del mismo para todo el conjunto, lo cual para este análisis es importante debido a que entre menor peso, mayor rendimiento del sistema de actuación.

Por todas las razones anteriormente expuestas el sistema tipo 2 está acorde a las necesidades del proyecto como un sistema bastante efectivo, esto sin tener en cuenta la parte termogasodinámica que es la más influyente para la selección final.

Para el caso del sistema tipo 4 se presentaron las mismas características del sistema anterior con respecto a la vectorización del flujo, este muestra unos resultados en donde la eficiencia es muy buena y apropiada para las necesidades que se tienen, además, desde el punto de vista del sistema de actuación tiene un alto rendimiento también en cuanto a la interacción y control de la vectorización del sistema. Otro punto adicional, es que este sistema debido a los pocos elementos que lo componen, tiene una disminución de peso considerable.

Gracias a lo anterior y teniendo en cuenta el modelo de vectorización total, se tiene que el sistema es muy ventajoso, ya que el flujo permanece más uniforme en toda la tobera, a pesar de que esta se vectorice. Este factor es vital para las aspiraciones de performance y rendimiento del sistema.

Es importante también aclarar que los dos sistemas mencionados anteriormente (tipo 2 y tipo 4), no poseen problemas tan determinantes como los otros dos casos. En el caso tipo 2 el problema que se presenta tiene que ver con respecto al cambio drástico de dirección que va estar sometido el flujo; desde el punto de vista de análisis del mecanismo se tiene una ventaja, ya que cuando se desee vectorizar la tobera para que opere en régimen subsónico se podrá realizar sin ninguna complicación.

En esta parte es cuando el sistema tipo 4 presenta problemas, debido a que la vectorización como es externa, no se mueven internamente las láminas, entonces en el momento que se desee vectorizar la misma para régimen subsónico, el mecanismo que debe realizar la vectorización, no lo podrá hacer adecuadamente, debido a que no tiene la forma de mover internamente las mismas. Es por esto que se debe proveer un sistema de actuación independiente, con el fin de que la tobera se vectorice para operación subsónica y se pueda realizar el movimiento en las láminas de la sección divergente.

Dentro del análisis que se realizó con respecto al mecanismo, fue importante determinar el dispositivo de actuación más adecuado para las necesidades y las características de trabajo de la tobera en sus diferentes posiciones. Se observó que el sistema de actuación con actuador pivote presenta muchas más ventajas desde el punto de vista de soporte estructural y disipación de cargas, con un método bastante eficiente y para una menor cantidad de peso, además de esto, el actuador con pivote tiene la característica de que se implementó un acople mecánico de transmisión de fuerza lo cual reduciría la longitud de vástago requerida.

Teniendo en cuentas las ventajas del sistema de pivote con respecto al dispositivo con cam, se definió que para las características de operación este método es mucho más eficiente y seguro.

Según lo anterior, el sistema tipo 2 presentan problemas debido a que el flujo sufre cambios drásticos y por consecuencia pérdidas, que según los datos mostrados por el análisis realizado en el programa FLUENT, se observaron cambios en las variaciones de presión que afectaban el comportamiento y la estabilidad del flujo

internamente, de esta manera, este sistema analizado en conjunto no se tiene en cuenta, debido a que un problema tan relevante en el comportamiento del gas es determinante para la selección óptima del mecanismo.

El sistema tipo 4 presentó mayores ventajas con respecto al análisis del comportamiento del flujo, debido a que cuando este se somete a la vectorización presenta resultados en donde los parámetros de presión y velocidad no sufren variaciones drásticas ni saltos, estos parámetros cambian gradualmente según el paso del flujo por el cambio de sección, además de esto, no hay presencia de saltos o presencia de ondas de choque cuando se somete a vectorización, lo cual para este caso muestra que el sistema es eficiente y más apto para desarrollarse mecánicamente.

Teniendo en cuenta el análisis estructural, luego que se ha seleccionado el diseño, se evaluaron las condiciones físicas de operación tales como el material de fabricación de este modelo el cual después de un análisis se llegó a la selección del compuesto de matriz de titanio que por su característica principal de temperatura (soportando 2000 ºK), se resaltó como el material de mejores condiciones.

En el programa de elementos finitos se sometió a las presiones y temperaturas máximas, donde AUTOFEA comprobó que este material se comportó muy bien a los esfuerzos y cargas que estaban sujetos a él; aunque los otros materiales como aleaciones de titanio o superaleaciones cumplían o tenían parámetros muy similares en cuanto a esfuerzos no cumplían con la principal característica de temperatura, razón por la cual podría fallar la estructura.

Al seleccionar la matriz de titanio se realizaron los análisis estructurales de la tobera mostrando resultados y gráficas de deformación y esfuerzos, comprobando que era un material versátil para evitar la elongación de la lámina.

Para finalizar, se determinó que el sistema hidráulico apropiado tuvo dificultades en la sincronización, ya que se observó la necesidad de implementar un conjunto de variados elementos que en función de los parámetros de operación, deben regular adecuadamente la posición de la tobera para los diferentes regimenes de vectorización. Entre estos elementos se nombran principalmente sistemas tipo FADEC, sensores magnéticos, etc.

En función de estos y teniendo en cuenta la aplicación de la filosofía de diseño de falla segura, se consideró más segura la implementación de un sistema de doble vástago, los cuales son utilizados en las partes superior e inferior respectivamente. Para esta parte de la metodología, fue importante analizar como criterio de estudio la selección de los actuadores en función de las diferentes variables con las que los mismos trabajarán.

Fue a través de lo anterior, que se desarrolló un método sencillo para la determinación de los parámetros de evaluación básicos con los cuales se pudieron observar las principales características de operación del sistema; este método se determinó que es eficiente para realizar el desarrollo preliminar del sistema hidráulico de la tobera vectorial.

Gracias a la interpretación de los diferentes análisis de cada sistema, se determinaron las principales características que deben ser evaluadas durante el diseño preliminar de una tobera vectorial. Mediante el análisis termogasodinámico y estructural de la misma se estableció la mejor manera de vectorizar el flujo obteniendo el mejor rendimiento para el conjunto en general. Por el otro lado, la optimización del sistema de actuación y el sistema hidráulico permiten que se utilicen menos cantidad de elementos, se aumente el nivel de seguridad de operación y se disminuyan los costos de diseño.

16. RECOMENDACIONES

- Desarrollar una teoría sencilla sobre análisis de perfilamiento de toberas.

- Realizar un análisis de los niveles de ruido que produce la tobera para cada uno de los respectivos ángulos de vectorización.

- Efectuar el estudio de mecanismo de refrigeración de los contornos de la tobera.

- Hacer un estudio sobre el diseño de la geometría externa de la tobera como elemento que reduce los perfiles de calor que están siendo enviados al ambiente.

- Desarrollar el diseño detallado del mecanismo.

BIBLIOGRAFIA

[1.] MATTINGLY, Jack D. Element of gas turbine propulsión. United States of America: McGraw-Hill. 1996. 797-813p.

[2.] OATES, Gordon C. Aircraft propulsion systems technology and design. United States of America: AIAA Education Series. 1989. p.

[3.] ARCHER, R. Douglas y SAARLAS, Maido. An introduction to aerospace propulsión. New Jersey: Prentice Hall. 1996. 582p.

[4.] GUNSTON, Bill. Jet and turbine aero engines. London: Patrick Stephens Limited. 1997. 49-62p.

[5.] DONALD, David. The complete encyclopedia of world aircraft. New York: Barnes & Noble Books. 1997. 929p.

[6.] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Colombianas para la presentación de trabajos de investigación. Quinta actualización. Bogotá D.C. ICONTEC, 2002. 126p. NTC 1486.

[7.] CUESTA ALVAREZ, Martín. Motores de reacción. Madrid: Paraninfo S.A. 1995.738 p.

[8.] CEMBRANOS NISTAL, Florencio Jesús. Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos. Madrid: Paraninfo. 1999. 169p.

[9.] VILORIA, José Roldán. Neumática, hidráulica y electricidad aplicada. Madrid: Paraninfo. 1995. 241p.

[10.] Aircraft Hydraulic Systems. USA: Library of Congress Cataloging-in-publication data. 1985.100p.

[11.] NEESE, William A. Aircraft Hydraulic Systems. Florida: Krieger Publishing Company. 1991. 518p.

[12.] ARVIZU LARA, Jaime. Física para Ciencias e Ingeniería. México D.F.: Harla S.A. 1980. Apéndice-17.

[13.] MUNSON, Bruce R., YOUNG, Donald F. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. México D.F.: Editorial Limusa S.A. 1999. 867p.

[14.] DOROSHKO, Sergey. Automatics of Aircraft Engines Part I Basics of Automatics. Bogotá D.C.: Editorial Bonaventuriana. 2004. 1-61p.

[15.] http://www.pratt-whitney.com/presskit/images/f119_cutaway_high.jpg

[16.] http://www.aerolubes.com/hyd.asp

[17.] http://www.tpub.com/content/aviation/14018/css/14018_178.htm

[18.] http://www.engineeringtoolbox.com

[19.] http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/

[20.] http://www.joshmadison.com/software

[21.] http://www.didi.com/www/hps/pumpsVariable.html

[22.] http://www.heaterdesign.com/manual/

[23.] http://www.nasatech.com/Briefs/Dec98/DRC9749.html

[24.] http://www.pointwise.com/apps/vecnoz.shtml

[25.] http://www.afosr.af.mil/pdfs/May03RH3.pdf#search='vectoring%20nozzle%20cost'

[26.] http://12.2.169.175/technical/tables/centistokes.pdf

[27.] http://www.parker.com

[28.] http://www.skydrol.com/

[29.] U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS). Washington, D.C.:Scientific Report. 2003. 873 – 1179 p.

ANEXOS

ANEXO A

Atmósfera Estándar

Altitud [m]	**Temperatura** [Kelvin]	**Presión** [pascal]	**Densidad** [kg/m3]	**Velocidad del sonido** [m/s]
0	288.15	101325	1.225	340.2941
500	284.9	95460.8393	1.1673	338.3696
1000	281.65	89874.5705	1.1116	336.434
1500	278.4	84556.0048	1.0581	334.4873
2000	275.15	79495.2155	1.0065	332.5292
2500	271.9	74682.5337	0.9569	330.5595
3000	268.65	70108.5447	0.9091	328.578
3500	265.4	65764.0844	0.8632	326.5845
4000	262.15	61640.2353	0.8191	324.5787
4500	258.9	57728.323	0.7768	322.5604
5000	255.65	54019.9121	0.7361	320.5295
5500	252.4	50506.803	0.6971	318.4856
6000	249.15	47181.0276	0.6597	316.4284
6500	245.9	44034.8461	0.6238	314.3579
7000	242.65	41060.7432	0.5895	312.2736
7500	239.4	38251.4241	0.5566	310.1752
8000	236.15	35599.8114	0.5252	308.0626
8500	232.9	33099.0409	0.4951	305.9355
9000	229.65	30742.4584	0.4663	303.7934

9500	226.4	28523.6158	0.4389	301.6361
10000	223.15	26436.2676	0.4127	299.4632
10500	219.9	24474.3673	0.3877	297.2745
11000	216.65	22632.064	0.3639	295.0696
11500	216.65	20916.189	0.3363	295.0696
12000	216.65	19330.405	0.3108	295.0696
12500	216.65	17864.849	0.2873	295.0696
13000	216.65	16510.4058	0.2655	295.0696
13500	216.65	15258.6511	0.2454	295.0696
14000	216.65	14101.7996	0.2268	295.0696
14500	216.65	13032.6561	0.2096	295.0696
15000	216.65	12044.5709	0.1937	295.0696
15500	216.65	11131.3984	0.179	295.0696
16000	216.65	10287.4591	0.1654	295.0696
16500	216.65	9507.5041	0.1529	295.0696
17000	216.65	8786.6821	0.1413	295.0696
17500	216.65	8120.5101	0.1306	295.0696
18000	216.65	7504.8447	0.1207	295.0696
18500	216.65	6935.8566	0.1115	295.0696
19000	216.65	6410.0069	0.1031	295.0696
19500	216.65	5924.0252	0.0953	295.0696
20000	216.65	5474.8887	0.088	295.0696
20500	217.15	5060.2636	0.0812	295.4099
21000	217.65	4677.8862	0.0749	295.7498
21500	218.15	4325.1827	0.0691	296.0893
22000	218.65	3999.7902	0.0637	296.4284
22500	219.15	3699.5385	0.0588	296.7671

23000	219.65	3422.4343	0.0543	297.1055
23500	220.15	3166.6465	0.0501	297.4434
24000	220.65	2930.4922	0.0463	297.781
24500	221.15	2712.425	0.0427	298.1182
25000	221.65	2511.0234	0.0395	298.455
25500	222.15	2324.9802	0.0365	298.7915
26000	222.65	2153.0938	0.0337	299.1275
26500	223.15	1994.2584	0.0311	299.4632
27000	223.65	1847.4574	0.0288	299.7985
27500	224.15	1711.7549	0.0266	300.1335
28000	224.65	1586.2898	0.0246	300.468
28500	225.15	1470.2697	0.0227	300.8022
29000	225.65	1362.9648	0.021	301.136
29500	226.15	1263.7033	0.0195	301.4695
30000	226.65	1171.8665	0.018	301.8026
30500	227.15	1086.8844	0.0167	302.1353
31000	227.65	1008.232	0.0154	302.4676
31500	228.15	935.4254	0.0143	302.7996
32000	228.65	868.0187	0.0132	303.1312
32500	230.05	805.7187	0.0122	304.0578
33000	231.45	748.2282	0.0113	304.9816
33500	232.85	695.1501	0.0104	305.9026
34000	234.25	646.1222	0.0096	306.8208
34500	235.65	600.814	0.0089	307.7363
35000	237.05	558.9235	0.0082	308.6491
35500	238.45	520.1752	0.0076	309.5592
36000	239.85	484.3167	0.007	310.4666

36500	241.25	451.1177	0.0065	311.3714
37000	242.65	420.3671	0.006	312.2736
37500	244.05	391.8718	0.0056	313.1731
38000	245.45	365.4547	0.0052	314.0701
38500	246.85	340.9539	0.0048	314.9645
39000	248.25	318.2205	0.0045	315.8564
39500	249.65	297.1181	0.0041	316.7458
40000	251.05	277.5216	0.0039	317.6327

$$\Pr ef = 1.013\times10^{5}\ {}^{N}\!/_{m^2};\ \rho ref = 1.225\ {}^{Kg}\!/_{m^3};\ Tref = 288.2°K$$

ANEXO B

Funciones para flujo compresible

$$\frac{T}{Tt} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-1}$$

$$\frac{P}{Pt} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-\gamma/(\gamma-1)}$$

$$\frac{\rho}{\rho t} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-1/(\gamma-1)}$$

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M}\left(\frac{2}{\gamma+1}\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)\right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$$

$$MFP\sqrt{\frac{R}{g_c}} = \frac{M\sqrt{\gamma}}{\left[1 + \left[(\gamma-1)/2\right]M^2\right]^{(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]}}$$

$$\sqrt{\frac{R}{g_c}} = 1.28758 \frac{lb.s}{lbm.\sqrt{^oR}}$$

Funciones para flujo compresible y=1.33

M	T/Tt	P/Pt	ρ/ρt	A/A*	MFP√R/gc
0	1	1	1	indef	0
0,01	0,999984	0,999934	0,99995	58,32768	0,011532
0,02	0,999934	0,999734	0,9998	29,16894	0,023060
0,03	0,999852	0,999402	0,99955	19,45162	0,034580
0,04	0,999736	0,998937	0,9992	14,59466	0,046087
0,05	0,999588	0,998339	0,998751	11,68185	0,057579
0,06	0,999406	0,99761	0,998202	9,741113	0,069050
0,07	0,999192	0,996748	0,997554	8,355846	0,080498
0,08	0,998945	0,995755	0,996807	7,31775	0,091917
0,09	0,998665	0,994632	0,995961	6,511104	0,103305
0,1	0,998353	0,993378	0,995017	5,866473	0,114656
0,11	0,998007	0,991994	0,993974	5,339673	0,125968
0,12	0,99763	0,990481	0,992834	4,901248	0,137236
0,13	0,997219	0,98884	0,991597	4,530805	0,148457
0,14	0,996776	0,987071	0,990264	4,213778	0,159626
0,15	0,996301	0,985176	0,988834	3,939486	0,170740
0,16	0,995794	0,983155	0,987308	3,699917	0,181796
0,17	0,995254	0,98101	0,985688	3,488945	0,192788
0,18	0,994682	0,978741	0,983973	3,301806	0,203715
0,19	0,994079	0,976349	0,982165	3,134737	0,214572
0,2	0,993443	0,973836	0,980263	2,984731	0,225356
0,21	0,992776	0,971202	0,978269	2,849351	0,236064
0,22	0,992077	0,96845	0,976184	2,726604	0,246691
0,23	0,991347	0,96558	0,974009	2,614845	0,257235
0,24	0,990585	0,962594	0,971743	2,512701	0,267691
0,25	0,989793	0,959494	0,969388	2,41902	0,278058
0,26	0,988969	0,956279	0,966946	2,332827	0,288332
0,27	0,988114	0,952953	0,964416	2,253293	0,298509
0,28	0,987229	0,949517	0,9618	2,179704	0,308587
0,29	0,986313	0,945972	0,959099	2,111448	0,318563
0,3	0,985367	0,94232	0,956314	2,047994	0,328433
0,31	0,984391	0,938563	0,953445	1,988877	0,338195
0,32	0,983385	0,934702	0,950495	1,933694	0,347846
0,33	0,982349	0,93074	0,947464	1,882088	0,357384
0,34	0,981283	0,926677	0,944353	1,833746	0,366806
0,35	0,980188	0,922516	0,941163	1,788389	0,376109
0,36	0,979064	0,918259	0,937895	1,74577	0,385290
0,37	0,97791	0,913908	0,934552	1,705669	0,394349
0,38	0,976728	0,909464	0,931133	1,667889	0,403281
0,39	0,975518	0,90493	0,92764	1,632254	0,412086
0,4	0,974279	0,900307	0,924075	1,598603	0,420760
0,41	0,973012	0,895597	0,920438	1,566794	0,429302
0,42	0,971717	0,890804	0,916731	1,536696	0,437711
0,43	0,970395	0,885928	0,912956	1,508193	0,445983
0,44	0,969045	0,880971	0,909113	1,481177	0,454117
0,45	0,967668	0,875936	0,905204	1,455551	0,462113
0,46	0,966264	0,870826	0,90123	1,431226	0,469967
0,47	0,964833	0,865641	0,897193	1,40812	0,477678
0,48	0,963376	0,860385	0,893093	1,38616	0,485246
0,49	0,961893	0,855059	0,888933	1,365277	0,492668
0,5	0,960384	0,849665	0,884714	1,345408	0,499944

Funciones para flujo compresible y=1.33

M	T/Tt	P/Pt	ρ/ρt	A/A*	MFP√R/gc
0,51	0,95885	0,844207	0,880437	1,326495	0,507072
0,52	0,95729	0,838685	0,876104	1,308485	0,514051
0,53	0,955705	0,833102	0,871715	1,291329	0,520881
0,54	0,954095	0,827461	0,867273	1,274982	0,527559
0,55	0,95246	0,821763	0,862779	1,2594	0,534087
0,56	0,950802	0,816011	0,858234	1,244545	0,540461
0,57	0,949119	0,810206	0,85364	1,23038	0,546684
0,58	0,947413	0,804352	0,848999	1,216872	0,552752
0,59	0,945683	0,79845	0,84431	1,203989	0,558667
0,6	0,943931	0,792503	0,839577	1,191701	0,564427
0,61	0,942155	0,786512	0,834801	1,179982	0,570033
0,62	0,940357	0,78048	0,829982	1,168806	0,575483
0,63	0,938537	0,774409	0,825123	1,158149	0,580779
0,64	0,936694	0,7683	0,820225	1,147988	0,585919
0,65	0,934831	0,762158	0,81529	1,138302	0,590905
0,66	0,932945	0,755982	0,810318	1,129073	0,595735
0,67	0,931039	0,749776	0,805311	1,120281	0,600411
0,68	0,929112	0,743542	0,800271	1,111909	0,604931
0,69	0,927165	0,737281	0,795199	1,103941	0,609298
0,7	0,925198	0,730996	0,790097	1,096361	0,613510
0,71	0,923211	0,724689	0,784966	1,089155	0,617569
0,72	0,921204	0,718361	0,779807	1,08231	0,621475
0,73	0,919178	0,712016	0,774622	1,075813	0,625228
0,74	0,917133	0,705654	0,769412	1,069652	0,628829
0,75	0,91507	0,699277	0,764179	1,063815	0,632280
0,76	0,912989	0,692888	0,758923	1,058291	0,635580
0,77	0,910889	0,686489	0,753647	1,053071	0,638730
0,78	0,908772	0,680081	0,748352	1,048145	0,641732
0,79	0,906638	0,673667	0,743039	1,043504	0,644586
0,8	0,904486	0,667247	0,737708	1,039139	0,647294
0,81	0,902318	0,660824	0,732363	1,035042	0,649856
0,82	0,900134	0,6544	0,727004	1,031206	0,652273
0,83	0,897933	0,647977	0,721631	1,027623	0,654548
0,84	0,895717	0,641555	0,716248	1,024287	0,656680
0,85	0,893485	0,635137	0,710854	1,02119	0,658671
0,86	0,891239	0,628725	0,705451	1,018327	0,660523
0,87	0,888977	0,622319	0,70004	1,015692	0,662237
0,88	0,886701	0,615923	0,694623	1,013279	0,663813
0,89	0,884411	0,609536	0,6892	1,011084	0,665255
0,9	0,882106	0,603161	0,683773	1,0091	0,666563
0,91	0,879789	0,596799	0,678344	1,007324	0,667738
0,92	0,877458	0,590452	0,672912	1,00575	0,668783
0,93	0,875114	0,584121	0,66748	1,004376	0,669698
0,94	0,872757	0,577807	0,662048	1,003195	0,670486
0,95	0,870388	0,571512	0,656617	1,002206	0,671148
0,96	0,868007	0,565237	0,651189	1,001404	0,671686
0,97	0,865615	0,558984	0,645765	1,000785	0,672101
0,98	0,86321	0,552753	0,640345	1,000347	0,672395
0,99	0,860795	0,546546	0,634931	1,000086	0,672570
1	0,858369	0,540364	0,629524	1	0,672628

Funciones para flujo compresible y=1.33

M	T/Tt	P/Pt	ρ/ρt	A/A*	MFP√R/gc
1,01	0,855932	0,534208	0,624124	1,000085	0,672571
1,02	0,853486	0,52808	0,618733	1,00034	0,672400
1,03	0,851029	0,52198	0,613352	1,000761	0,672117
1,04	0,848562	0,51591	0,607981	1,001346	0,671724
1,05	0,846086	0,50987	0,602621	1,002094	0,671223
1,06	0,843601	0,503861	0,597274	1,003001	0,670616
1,07	0,841108	0,497885	0,59194	1,004066	0,669904
1,08	0,838605	0,491942	0,586619	1,005288	0,669091
1,09	0,836095	0,486034	0,581314	1,006663	0,668176
1,1	0,833576	0,48016	0,576024	1,008192	0,667163
1,11	0,83105	0,474323	0,570751	1,009872	0,666053
1,12	0,828517	0,468522	0,565494	1,011701	0,664849
1,13	0,825976	0,462758	0,560256	1,013679	0,663552
1,14	0,823429	0,457033	0,555036	1,015804	0,662163
1,15	0,820875	0,451347	0,549836	1,018075	0,660686
1,16	0,818315	0,4457	0,544656	1,020491	0,659122
1,17	0,815748	0,440093	0,539496	1,023051	0,657473
1,18	0,813176	0,434527	0,534358	1,025754	0,655741
1,19	0,810598	0,429002	0,529241	1,028598	0,653927
1,2	0,808016	0,423519	0,524148	1,031584	0,652034
1,21	0,805428	0,418079	0,519077	1,034711	0,650064
1,22	0,802835	0,412682	0,51403	1,037977	0,648019
1,23	0,800238	0,407327	0,509008	1,041382	0,645900
1,24	0,797636	0,402017	0,50401	1,044927	0,643709
1,25	0,795031	0,396751	0,499038	1,048609	0,641448
1,26	0,792422	0,391529	0,494092	1,05243	0,639120
1,27	0,789809	0,386352	0,489172	1,056388	0,636725
1,28	0,787193	0,381221	0,484278	1,060483	0,634266
1,29	0,784574	0,376135	0,479413	1,064715	0,631745
1,3	0,781953	0,371095	0,474574	1,069083	0,629164
1,31	0,779328	0,3661	0,469764	1,073589	0,626523
1,32	0,776701	0,361153	0,464983	1,078231	0,623826
1,33	0,774073	0,356251	0,46023	1,083009	0,621074
1,34	0,771442	0,351397	0,455506	1,087924	0,618268
1,35	0,768809	0,346589	0,450813	1,092975	0,615411
1,36	0,766175	0,341828	0,446149	1,098163	0,612503
1,37	0,76354	0,337114	0,441515	1,103487	0,609548
1,38	0,760904	0,332448	0,436912	1,108949	0,606546
1,39	0,758267	0,327829	0,432339	1,114548	0,603499
1,4	0,755629	0,323257	0,427798	1,120283	0,600409
1,41	0,752991	0,318732	0,423288	1,126157	0,597278
1,42	0,750353	0,314255	0,41881	1,132169	0,594106
1,43	0,747715	0,309826	0,414364	1,138319	0,590896
1,44	0,745077	0,305443	0,409949	1,144607	0,587650
1,45	0,742439	0,301109	0,405567	1,151035	0,584368
1,46	0,739801	0,296821	0,401217	1,157603	0,581053
1,47	0,737165	0,292581	0,3969	1,164311	0,577705
1,48	0,734529	0,288387	0,392615	1,171159	0,574327
1,49	0,731895	0,284241	0,388364	1,178149	0,570920
1,5	0,729262	0,280142	0,384145	1,185281	0,567484

Funciones para flujo compresible y=1.33

M	T/Tt	P/Pt	ρ/ρt	A/A*	MFP√R/gc
1,51	0,72663	0,27609	0,379959	1,192556	0,564023
1,52	0,724	0,272084	0,375807	1,199974	0,560536
1,53	0,721371	0,268125	0,371688	1,207536	0,557026
1,54	0,718745	0,264212	0,367602	1,215242	0,553493
1,55	0,716121	0,260346	0,36355	1,223095	0,549940
1,56	0,713499	0,256525	0,359532	1,231093	0,546367
1,57	0,710879	0,252751	0,355547	1,239239	0,542775
1,58	0,708262	0,249022	0,351595	1,247533	0,539167
1,59	0,705648	0,245338	0,347678	1,255976	0,535542
1,6	0,703037	0,2417	0,343794	1,264569	0,531903
1,61	0,700429	0,238106	0,339943	1,273313	0,528251
1,62	0,697824	0,234557	0,336127	1,282208	0,524586
1,63	0,695222	0,231053	0,332344	1,291257	0,520910
1,64	0,692624	0,227592	0,328594	1,300459	0,517224
1,65	0,69003	0,224176	0,324879	1,309817	0,513529
1,66	0,687439	0,220803	0,321196	1,31933	0,509826
1,67	0,684852	0,217473	0,317548	1,329001	0,506116
1,68	0,68227	0,214187	0,313933	1,33883	0,502400
1,69	0,679691	0,210943	0,310351	1,348819	0,498680
1,7	0,677117	0,207741	0,306803	1,358968	0,494955
1,71	0,674547	0,204582	0,303288	1,369279	0,491228
1,72	0,671982	0,201464	0,299806	1,379754	0,487499
1,73	0,669421	0,198388	0,296358	1,390393	0,483768
1,74	0,666865	0,195353	0,292942	1,401199	0,480038
1,75	0,664314	0,192358	0,289559	1,412171	0,476308
1,76	0,661768	0,189404	0,286209	1,423312	0,472580
1,77	0,659227	0,18649	0,282892	1,434623	0,468854
1,78	0,656691	0,183616	0,279608	1,446105	0,465131
1,79	0,654161	0,180781	0,276355	1,457761	0,461412
1,8	0,651636	0,177985	0,273136	1,46959	0,457698
1,81	0,649116	0,175228	0,269948	1,481596	0,453989
1,82	0,646602	0,172508	0,266792	1,493779	0,450287
1,83	0,644094	0,169827	0,263669	1,50614	0,446591
1,84	0,641592	0,167184	0,260577	1,518682	0,442903
1,85	0,639095	0,164577	0,257516	1,531407	0,439223
1,86	0,636605	0,162008	0,254487	1,544315	0,435551
1,87	0,63412	0,159474	0,251489	1,557408	0,431890
1,88	0,631642	0,156977	0,248523	1,570689	0,428238
1,89	0,62917	0,154516	0,245587	1,584158	0,424597
1,9	0,626704	0,15209	0,242682	1,597817	0,420967
1,91	0,624244	0,149698	0,239807	1,611669	0,417349
1,92	0,621792	0,147342	0,236963	1,625715	0,413743
1,93	0,619345	0,145019	0,234149	1,639957	0,410150
1,94	0,616905	0,142731	0,231366	1,654396	0,406570
1,95	0,614472	0,140475	0,228611	1,669035	0,403004
1,96	0,612046	0,138253	0,225887	1,683876	0,399452
1,97	0,609627	0,136064	0,223192	1,69892	0,395915
1,98	0,607214	0,133906	0,220526	1,714169	0,392393
1,99	0,604808	0,131781	0,217889	1,729625	0,388887
2	0,60241	0,129687	0,215281	1,74529	0,385396

Funciones para flujo compresible y=1.33

M	T/Tt	P/Pt	ρ/ρt	A/A*	MFP√R/gc
2,01	0,600018	0,127625	0,212702	1,761167	0,381922
2,02	0,597634	0,125593	0,21015	1,777257	0,378464
2,03	0,595256	0,123592	0,207628	1,793562	0,375024
2,04	0,592886	0,12162	0,205133	1,810085	0,371601
2,05	0,590524	0,119679	0,202665	1,826827	0,368195
2,06	0,588168	0,117766	0,200226	1,843791	0,364807
2,07	0,58582	0,115883	0,197813	1,860979	0,361438
2,08	0,58348	0,114028	0,195428	1,878392	0,358087
2,09	0,581147	0,112202	0,19307	1,896035	0,354755
2,1	0,578821	0,110403	0,190738	1,913907	0,351443
2,11	0,576503	0,108632	0,188433	1,932013	0,348149
2,12	0,574193	0,106888	0,186154	1,950353	0,344875
2,13	0,57189	0,105171	0,183901	1,968932	0,341621
2,14	0,569595	0,10348	0,181673	1,987749	0,338387
2,15	0,567307	0,101816	0,179472	2,00681	0,335173
2,16	0,565028	0,100177	0,177295	2,026114	0,331979
2,17	0,562756	0,098563	0,175144	2,045666	0,328807
2,18	0,560492	0,096975	0,173017	2,065467	0,325654
2,19	0,558236	0,095411	0,170916	2,085521	0,322523
2,2	0,555988	0,093872	0,168838	2,105829	0,319413
2,21	0,553748	0,092357	0,166785	2,126394	0,316324
2,22	0,551515	0,090865	0,164756	2,147219	0,313256
2,23	0,549291	0,089397	0,162751	2,168306	0,310209
2,24	0,547075	0,087953	0,160769	2,189657	0,307184
2,25	0,544866	0,08653	0,15881	2,211277	0,304181
2,26	0,542666	0,085131	0,156875	2,233167	0,301199
2,27	0,540474	0,083753	0,154962	2,25533	0,298239
2,28	0,53829	0,082397	0,153072	2,277768	0,295301
2,29	0,536114	0,081063	0,151205	2,300486	0,292385
2,3	0,533946	0,07975	0,14936	2,323484	0,289491
2,31	0,531786	0,078458	0,147536	2,346767	0,286619
2,32	0,529634	0,077186	0,145735	2,370337	0,283769
2,33	0,527491	0,075935	0,143955	2,394196	0,280941
2,34	0,525355	0,074704	0,142196	2,418349	0,278135
2,35	0,523228	0,073492	0,140459	2,442797	0,275352
2,36	0,521109	0,0723	0,138742	2,467545	0,272590
2,37	0,518998	0,071127	0,137046	2,492594	0,269851
2,38	0,516896	0,069972	0,135371	2,517948	0,267134
2,39	0,514801	0,068837	0,133715	2,54361	0,264438
2,4	0,512715	0,067719	0,13208	2,569583	0,261766
2,41	0,510637	0,06662	0,130465	2,595871	0,259115
2,42	0,508568	0,065539	0,128869	2,622475	0,256486
2,43	0,506506	0,064474	0,127293	2,649401	0,253879
2,44	0,504453	0,063428	0,125735	2,67665	0,251295
2,45	0,502408	0,062398	0,124197	2,704226	0,248732
2,46	0,500372	0,061385	0,122678	2,732133	0,246192
2,47	0,498343	0,060388	0,121177	2,760373	0,243673
2,48	0,496323	0,059407	0,119695	2,788951	0,241176
2,49	0,494311	0,058443	0,11823	2,817869	0,238701
2,5	0,492308	0,057494	0,116784	2,84713	0,236248

Funciones para flujo compresible y=1.33

M	T/Tt	P/Pt	ρ/ρt	A/A*	MFP√R/gc
2,51	0,490312	0,05656	0,115356	2,87674	0,233816
2,52	0,488325	0,055642	0,113945	2,9067	0,231406
2,53	0,486346	0,054739	0,112551	2,937014	0,229018
2,54	0,484375	0,05385	0,111175	2,967686	0,226651
2,55	0,482413	0,052976	0,109816	2,99872	0,224305
2,56	0,480459	0,052117	0,108473	3,030119	0,221981
2,57	0,478513	0,051271	0,107147	3,061887	0,219678
2,58	0,476575	0,05044	0,105838	3,094027	0,217396
2,59	0,474645	0,049621	0,104544	3,126544	0,215135
2,6	0,472724	0,048817	0,103267	3,15944	0,212895
2,61	0,470811	0,048025	0,102006	3,192721	0,210676
2,62	0,468905	0,047247	0,10076	3,226388	0,208477
2,63	0,467009	0,046481	0,09953	3,260448	0,206299
2,64	0,46512	0,045728	0,098315	3,294902	0,204142
2,65	0,463239	0,044988	0,097115	3,329756	0,202005
2,66	0,461367	0,044259	0,095931	3,365013	0,199889
2,67	0,459502	0,043543	0,094761	3,400678	0,197792
2,68	0,457646	0,042838	0,093606	3,436754	0,195716
2,69	0,455798	0,042145	0,092465	3,473245	0,193660
2,7	0,453957	0,041464	0,091338	3,510155	0,191624
2,71	0,452125	0,040793	0,090226	3,54749	0,189607
2,72	0,450301	0,040134	0,089127	3,585252	0,187610
2,73	0,448485	0,039486	0,088042	3,623446	0,185632
2,74	0,446677	0,038848	0,086971	3,662076	0,183674
2,75	0,444877	0,038221	0,085913	3,701147	0,181735
2,76	0,443085	0,037604	0,084869	3,740663	0,179815
2,77	0,441301	0,036998	0,083837	3,780629	0,177914
2,78	0,439525	0,036401	0,082819	3,821048	0,176032
2,79	0,437756	0,035814	0,081814	3,861925	0,174169
2,8	0,435996	0,035237	0,080821	3,903265	0,172325
2,81	0,434243	0,03467	0,07984	3,945072	0,170498
2,82	0,432499	0,034112	0,078872	3,987351	0,168691
2,83	0,430762	0,033563	0,077916	4,030106	0,166901
2,84	0,429033	0,033024	0,076972	4,073342	0,165129
2,85	0,427312	0,032493	0,07604	4,117064	0,163376
2,86	0,425598	0,031971	0,07512	4,161276	0,161640
2,87	0,423893	0,031458	0,074212	4,205984	0,159922
2,88	0,422195	0,030953	0,073315	4,251191	0,158221
2,89	0,420504	0,030457	0,072429	4,296903	0,156538
2,9	0,418822	0,029968	0,071554	4,343125	0,154872
2,91	0,417147	0,029488	0,07069	4,389862	0,153223
2,92	0,41548	0,029016	0,069838	4,437118	0,151591
2,93	0,41382	0,028552	0,068996	4,484899	0,149976
2,94	0,412168	0,028095	0,068165	4,53321	0,148378
2,95	0,410524	0,027646	0,067344	4,582055	0,146796
2,96	0,408887	0,027205	0,066533	4,63144	0,145231
2,97	0,407258	0,02677	0,065733	4,68137	0,143682
2,98	0,405636	0,026343	0,064943	4,731851	0,142149
2,99	0,404021	0,025923	0,064163	4,782887	0,140632
3	0,402414	0,02551	0,063393	4,834484	0,139131

Funciones para flujo compresible y=1.33

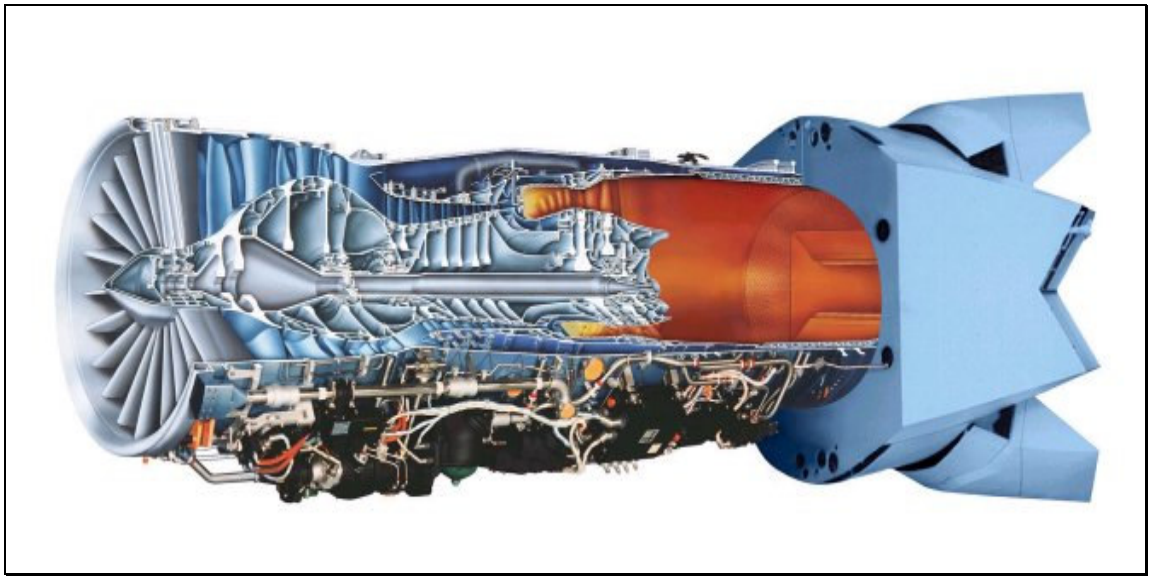
M	T/Tt	P/Pt	ρ/ρt	A/A*	MFP√R/gc
3,01	0,400815	0,025104	0,062633	4,886647	0,137646
3,02	0,399223	0,024705	0,061882	4,939381	0,136177
3,03	0,397638	0,024312	0,06114	4,992693	0,134723
3,04	0,396061	0,023925	0,060408	5,046587	0,133284
3,05	0,394491	0,023545	0,059686	5,10107	0,131860
3,06	0,392928	0,023172	0,058972	5,156146	0,130452
3,07	0,391373	0,022804	0,058267	5,211821	0,129058
3,08	0,389825	0,022443	0,057572	5,268101	0,127679
3,09	0,388284	0,022088	0,056885	5,324991	0,126315
3,1	0,38675	0,021738	0,056207	5,382498	0,124966
3,11	0,385223	0,021394	0,055537	5,440627	0,123631
3,12	0,383704	0,021056	0,054876	5,499384	0,122310
3,13	0,382192	0,020724	0,054223	5,558775	0,121003
3,14	0,380686	0,020397	0,053579	5,618806	0,119710
3,15	0,379188	0,020075	0,052942	5,679482	0,118431
3,16	0,377697	0,019759	0,052314	5,740811	0,117166
3,17	0,376213	0,019448	0,051693	5,802797	0,115915
3,18	0,374736	0,019142	0,051081	5,865447	0,114676
3,19	0,373266	0,018841	0,050476	5,928767	0,113452
3,2	0,371802	0,018545	0,049879	5,992764	0,112240
3,21	0,370346	0,018254	0,049289	6,057444	0,111042
3,22	0,368897	0,017968	0,048707	6,122812	0,109856
3,23	0,367454	0,017686	0,048132	6,188876	0,108683
3,24	0,366018	0,017409	0,047564	6,255642	0,107523
3,25	0,364589	0,017137	0,047004	6,323115	0,106376
3,26	0,363167	0,016869	0,04645	6,391304	0,105241
3,27	0,361752	0,016606	0,045904	6,460214	0,104119
3,28	0,360343	0,016347	0,045364	6,529852	0,103008
3,29	0,358941	0,016092	0,044832	6,600225	0,101910
3,3	0,357545	0,015841	0,044305	6,671339	0,100824
3,31	0,356156	0,015595	0,043786	6,743201	0,099749
3,32	0,354774	0,015352	0,043273	6,815818	0,098686
3,33	0,353398	0,015114	0,042767	6,889196	0,097635
3,34	0,352029	0,014879	0,042266	6,963344	0,096596
3,35	0,350666	0,014648	0,041773	7,038267	0,095567
3,36	0,34931	0,014421	0,041285	7,113973	0,094550
3,37	0,347961	0,014198	0,040803	7,190469	0,093544
3,38	0,346617	0,013978	0,040328	7,267762	0,092550
3,39	0,34528	0,013762	0,039859	7,345859	0,091566
3,4	0,34395	0,01355	0,039395	7,424767	0,090593
3,41	0,342626	0,013341	0,038937	7,504494	0,089630
3,42	0,341308	0,013135	0,038485	7,585047	0,088678
3,43	0,339996	0,012933	0,038039	7,666433	0,087737
3,44	0,338691	0,012734	0,037598	7,748661	0,086806
3,45	0,337392	0,012538	0,037162	7,831736	0,085885
3,46	0,336099	0,012346	0,036733	7,915668	0,084974
3,47	0,334812	0,012156	0,036308	8,000464	0,084074
3,48	0,333532	0,01197	0,035889	8,08613	0,083183
3,49	0,332257	0,011787	0,035475	8,172676	0,082302
3,5	0,330989	0,011607	0,035066	8,260109	0,081431

Funciones para flujo compresible y=1.33

M	T/Tt	P/Pt	ρ/ρt	A/A*	MFP√R/gc
3,51	0,329727	0,011429	0,034663	8,348436	0,080569
3,52	0,32847	0,011255	0,034264	8,437666	0,079717
3,53	0,32722	0,011083	0,03387	8,527807	0,078875
3,54	0,325976	0,010914	0,033481	8,618866	0,078041
3,55	0,324737	0,010748	0,033097	8,710852	0,077217
3,56	0,323505	0,010585	0,032718	8,803773	0,076402
3,57	0,322278	0,010424	0,032344	8,897636	0,075596
3,58	0,321058	0,010265	0,031974	8,992451	0,074799
3,59	0,319843	0,01011	0,031609	9,088226	0,074011
3,6	0,318634	0,009957	0,031248	9,184969	0,073231
3,61	0,31743	0,009806	0,030892	9,282688	0,072461
3,62	0,316233	0,009658	0,03054	9,381392	0,071698
3,63	0,315041	0,009512	0,030193	9,48109	0,070944
3,64	0,313855	0,009368	0,029849	9,581789	0,070199
3,65	0,312675	0,009227	0,029511	9,6835	0,069461
3,66	0,3115	0,009088	0,029176	9,78623	0,068732
3,67	0,310331	0,008952	0,028845	9,889988	0,068011
3,68	0,309167	0,008817	0,028519	9,994784	0,067298
3,69	0,308009	0,008685	0,028196	10,10063	0,066593
3,7	0,306857	0,008555	0,027878	10,20752	0,065895
3,71	0,30571	0,008426	0,027563	10,31548	0,065206
3,72	0,304568	0,0083	0,027253	10,42452	0,064524
3,73	0,303432	0,008176	0,026946	10,53464	0,063849
3,74	0,302302	0,008054	0,026643	10,64584	0,063182
3,75	0,301176	0,007934	0,026343	10,75815	0,062523
3,76	0,300057	0,007816	0,026048	10,87157	0,061870
3,77	0,298942	0,007699	0,025756	10,98612	0,061225
3,78	0,297833	0,007585	0,025467	11,10178	0,060587
3,79	0,296729	0,007472	0,025182	11,21859	0,059957
3,8	0,295631	0,007361	0,024901	11,33655	0,059333
3,81	0,294537	0,007252	0,024623	11,45567	0,058716
3,82	0,293449	0,007145	0,024348	11,57595	0,058106
3,83	0,292366	0,007039	0,024077	11,69741	0,057502
3,84	0,291288	0,006935	0,023809	11,82006	0,056906
3,85	0,290216	0,006833	0,023544	11,94391	0,056316
3,86	0,289148	0,006732	0,023283	12,06896	0,055732
3,87	0,288086	0,006633	0,023024	12,19524	0,055155
3,88	0,287028	0,006535	0,022769	12,32274	0,054584
3,89	0,285976	0,006439	0,022517	12,45148	0,054020
3,9	0,284929	0,006345	0,022268	12,58147	0,053462
3,91	0,283886	0,006252	0,022022	12,71271	0,052910
3,92	0,282849	0,00616	0,021779	12,84523	0,052364
3,93	0,281816	0,00607	0,021539	12,97903	0,051824
3,94	0,280789	0,005981	0,021302	13,11412	0,051290
3,95	0,279766	0,005894	0,021068	13,2505	0,050762
3,96	0,278748	0,005808	0,020837	13,38821	0,050240
3,97	0,277735	0,005724	0,020608	13,52723	0,049724
3,98	0,276727	0,00564	0,020382	13,66759	0,049213
3,99	0,275724	0,005558	0,020159	13,80929	0,048708
4	0,274725	0,005478	0,019939	13,95235	0,048209

ANEXO C

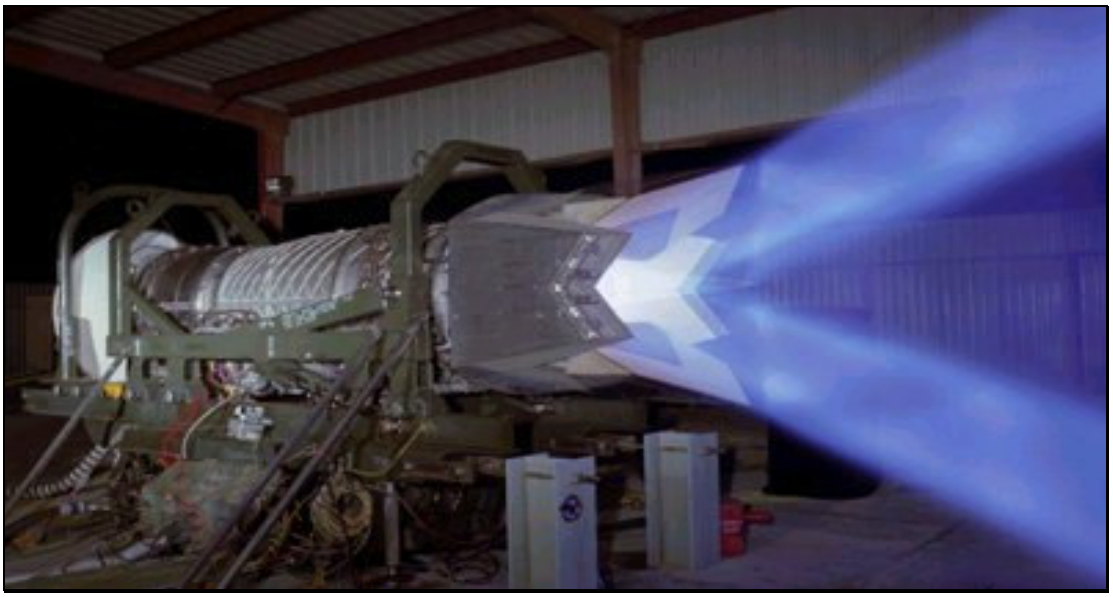
Motor F119-PW-100



Tomado de referencia 15

ANEXO D

Modelo del Motor F119-PW-100 con Tobera para Vectorización Bi – Dimensional



Tomado de referencia 15

ANEXO E

Generalidades de algunas bombas hidráulicas de desplazamiento positivo usadas en aviación

PVP-065 Series

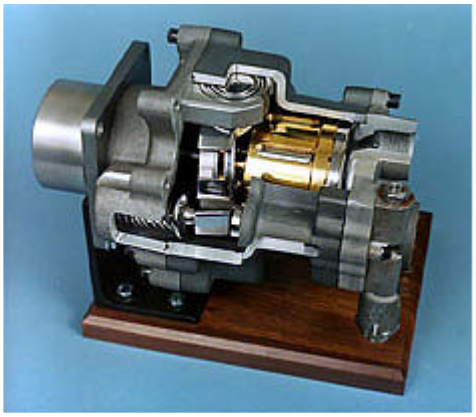


Tomado de referencia 21

Theoretical maximum displacement	(CIR.)	0.65	cubic cm/r	10.65
Maximum speed full flow at atmospheric inlet pressure	rpm	4000	rpm	4000
Pressure (rated continuous)(6000 spi @ reduced displacement)	psig	3000	bar	206.9
Pressure (maximum)	psig	3750	bar	258.6
Delivery at 4000 rpm	gpm	10.5	l/m	39.7
Input horsepower at maximum pressure & 4000 rpm	HP	21.8	kw	16.3
Weight (as shown)	lbs.	10.5	kg	4.76

Tomado de referencia 21

PVP-160 Series



Tomado de referencia 21

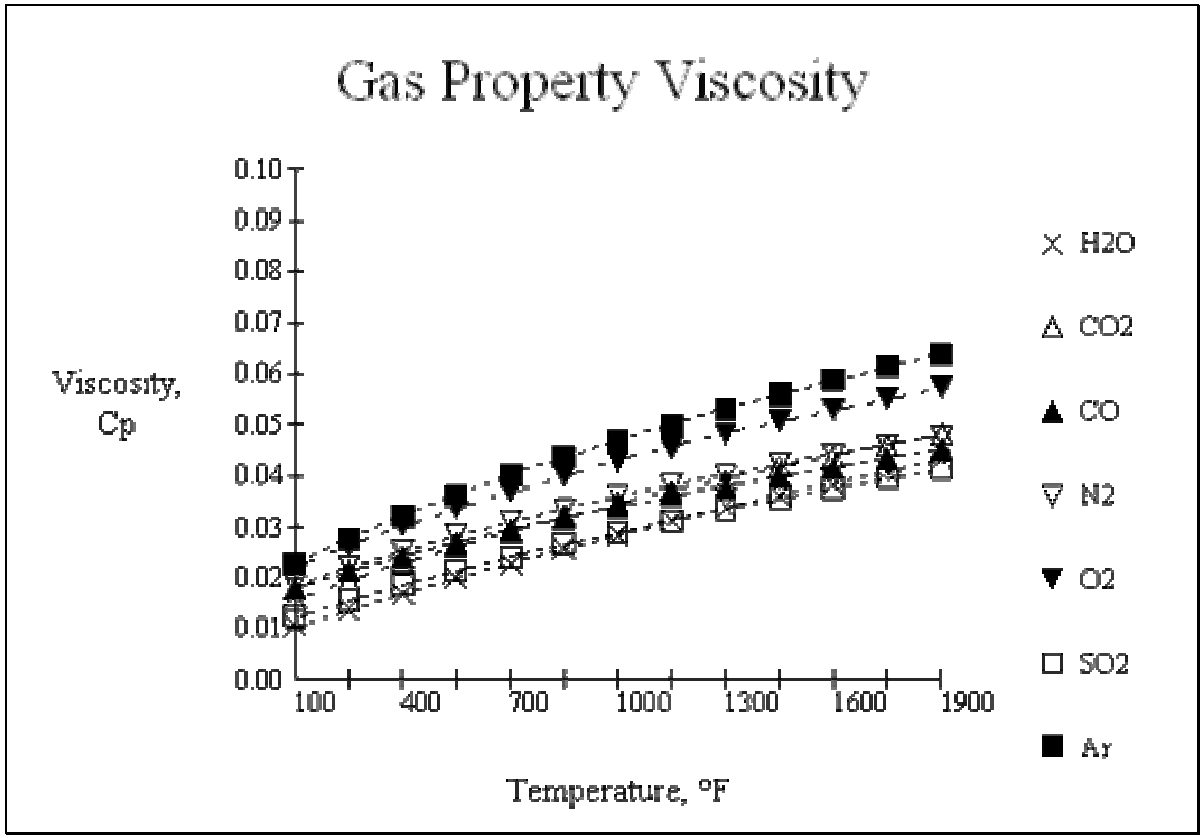
Theoretical maximum displacement		(CIR.)	1.6		cubic cm/r	26.2
Maximum speed full flow at atmospheric inlet pressure		rpm	2500		rpm	2500
Pressure (rated continuous)(6000 spi @ reduced displacement)		psig	3000		bar	206.9
Pressure (maximum)		psig	3750		bar	258.6
Delivery at 2500 rpm		gpm	16.4		l/m	62
Input horsepower at maximum pressure & 2500 rpm		HP	36.4		kw	27.1
Weight (as shown)		lbs.	18.8		kg	8.5

Tomado de referencia 21

ANEXO F

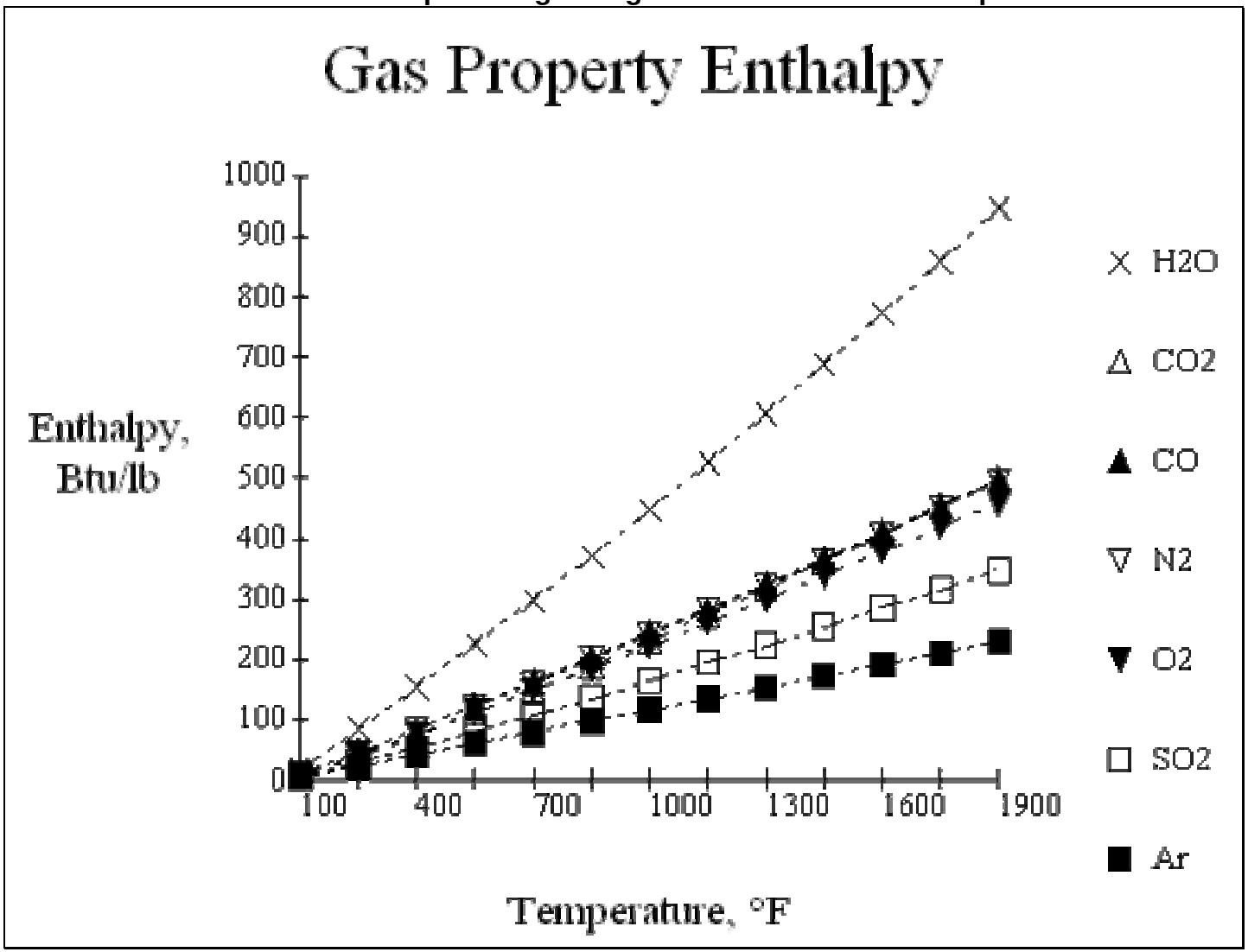
Algunas propiedades de los gases

Variación de la viscosidad de algunos gases en función de la temperatura



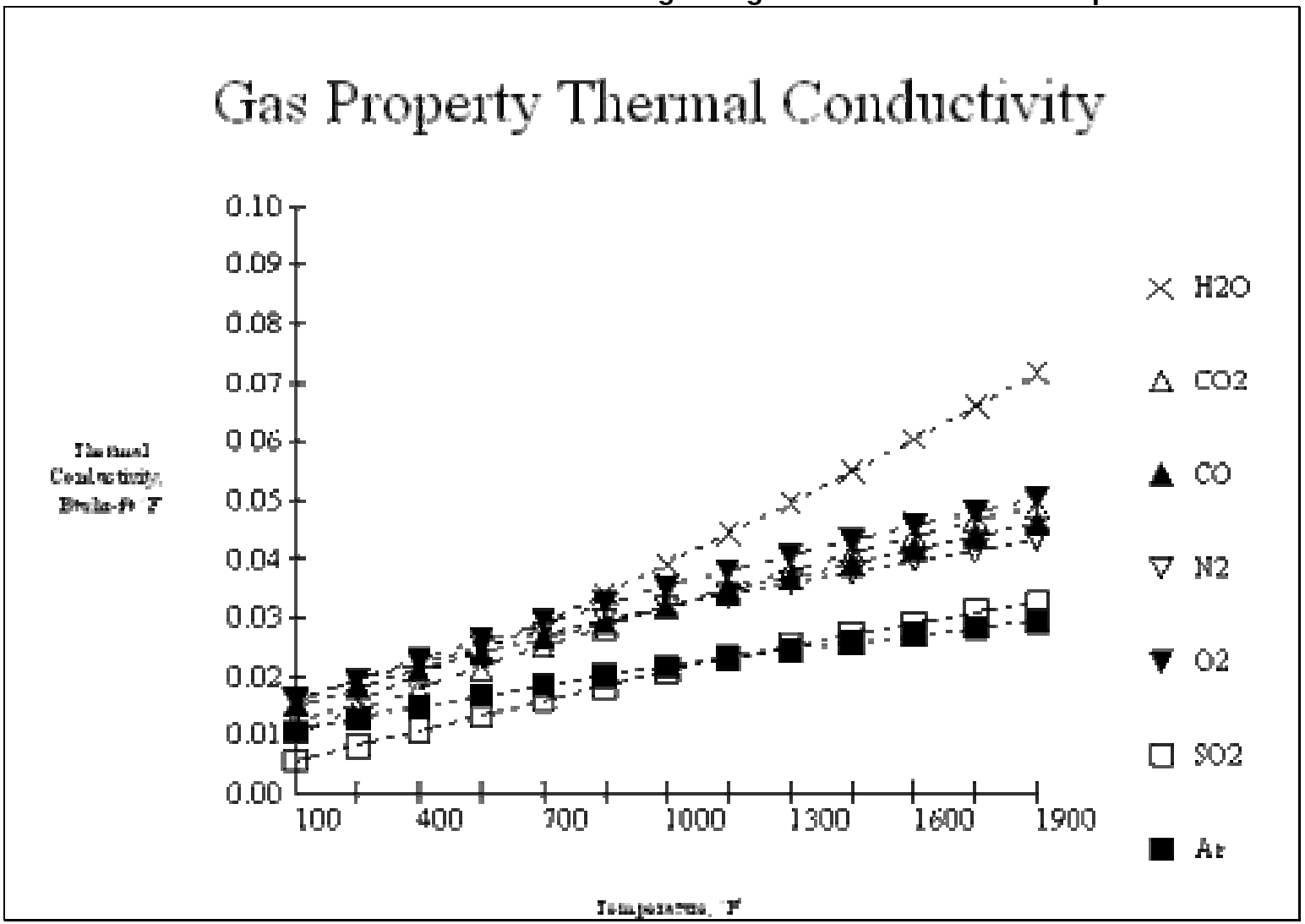
Tomado Referencia 21

Variación de la entalpía de algunos gases en función de la temperatura



Tomado Referencia 21

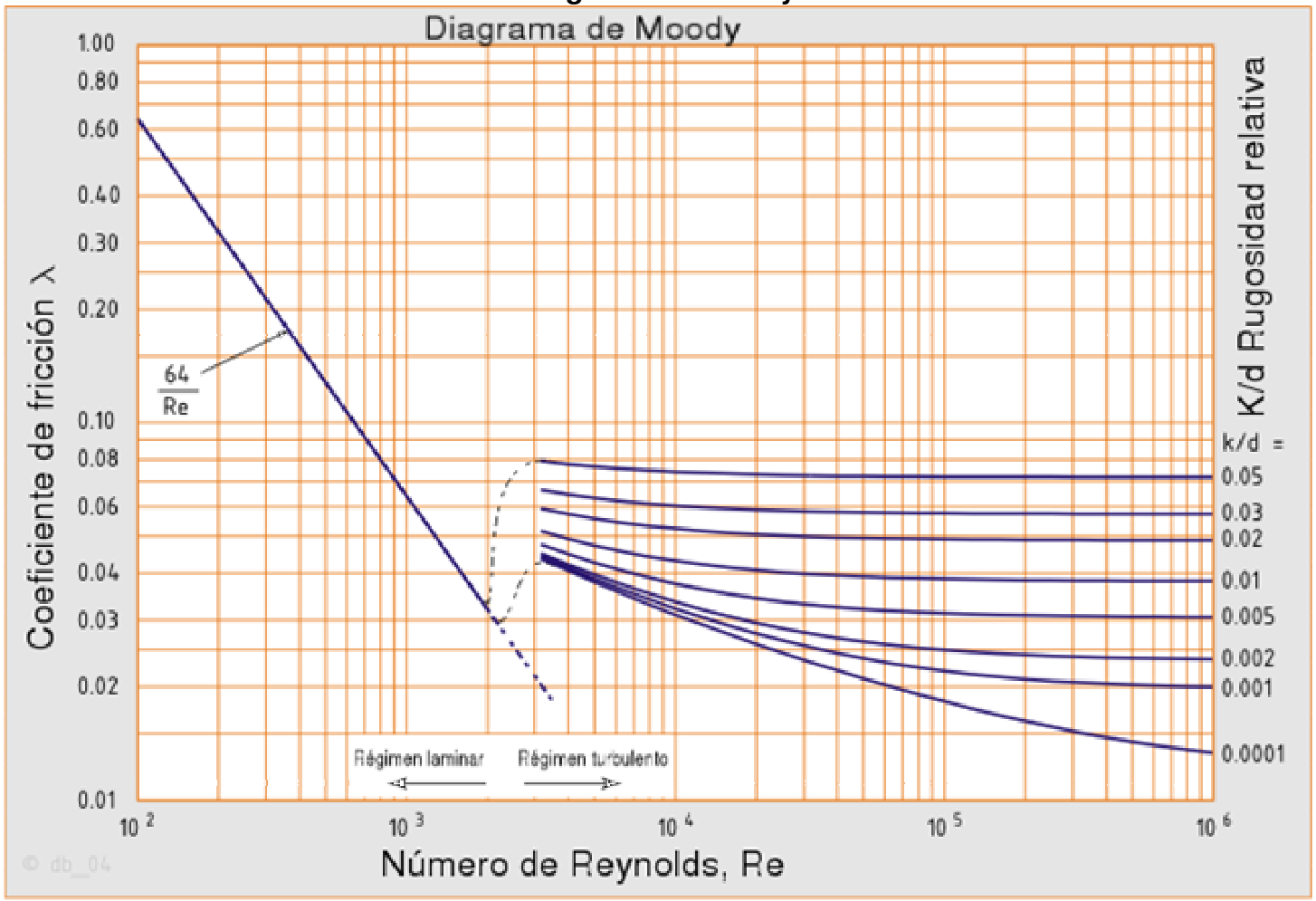
Variación de la conductividad térmica de algunos gases en función de la temperatura



Tomado Referencia 21

ANEXO G

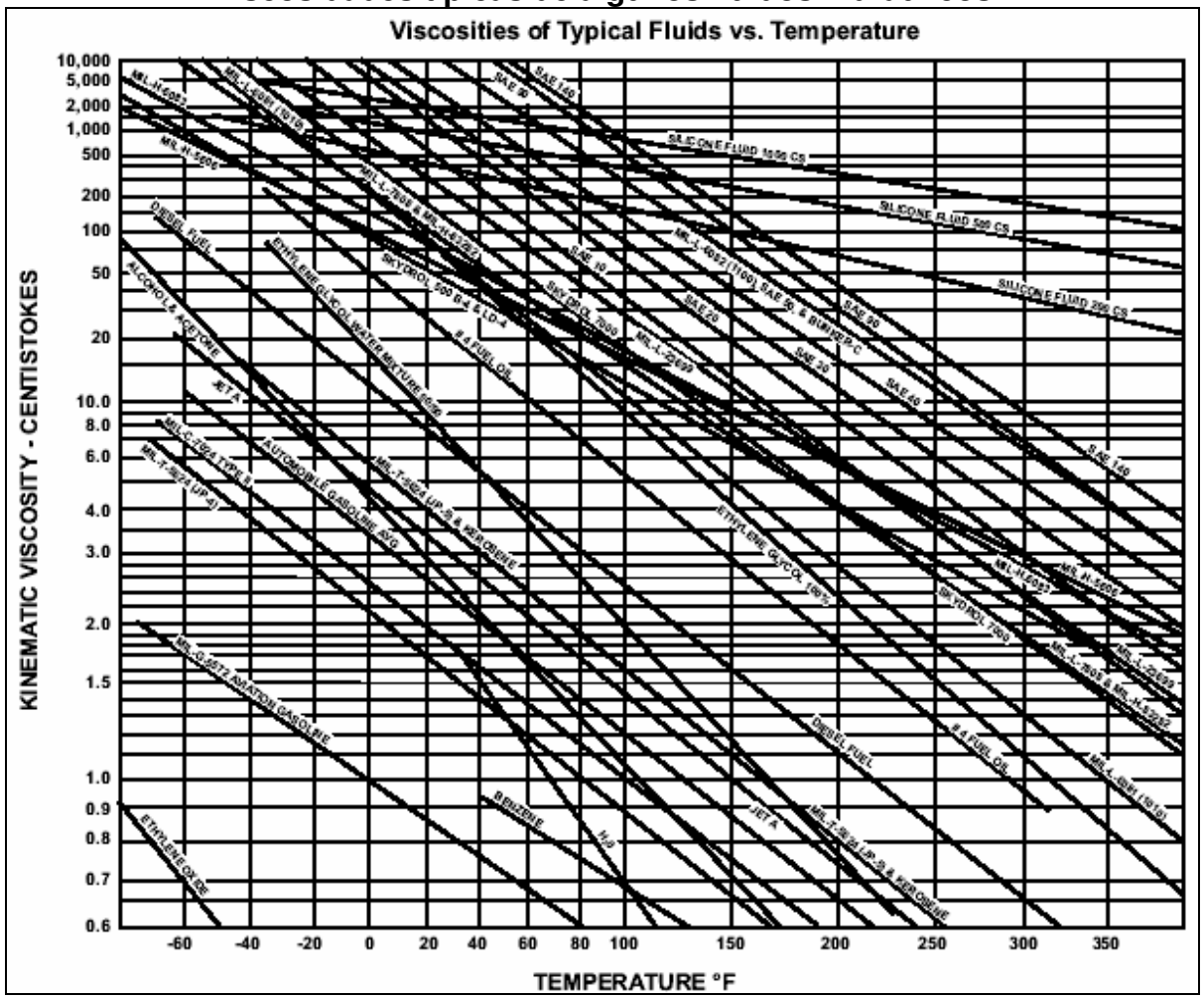
Diagrama de Moody



Tomado de referencia

ANEXO H

Viscosidades típicas de algunos fluidos hidráulicos



Tomado de referencia 27

ANEXO I

Tipos de fluidos hidráulicos utilizados en aviación

Elastomer/ Plastic	Mineral Oil Based Hydraulic Fluids	Synthetic Hydro-carbon Based Hydraulic Fluids
Flurocarbon (Viton)	Very Good	Very Good
Acrylonitrile	Good	Good
Polyester	Good	Good
Silicone	Poor to Good	Poor to Good
Teflon	Very Good	Very Good
Nylon	Poor to Good	Poor to Good
Buna-S	Poor	Poor
Perbunan	Good	Good
Methacrylate	Good	Good
Neoprene	Fair to Good	Fair to Good
Natural Rubber	Poor to Fair	Poor to Fair
Polyethylene	Good	Good
Butyl Rubber	Very Poor to Poor	Very Poor to Poor
Poly Vinyl Chloride	Poor to Good	Poor to Good

Compatibility Rating:
Very Good – Good – Fair – Poor – Very Poor

TYPES OF HYDRAULIC FLUIDS

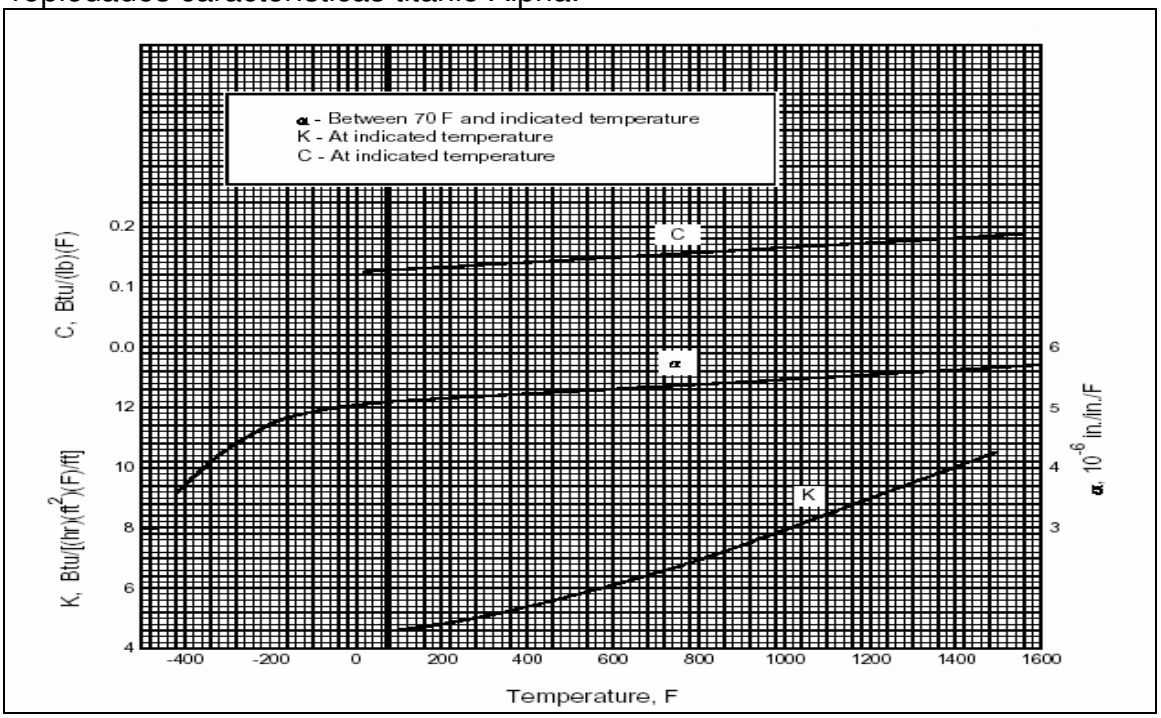
Mineral	Synthetic Hydrocarbon	Phosphate Ester
AeroShell Fluid 4	AeroShell Fluid 31	Skydrol 500B4
AeroShell Fluid 41	AeroShell Fluid 51	Skydrol LD4
AeroShell Fluid 71	AeroShell Fluid 61	
AeroShell Fluid SSF		
AeroShell Fluid LGF		

http://193.113.209.166/aeroshell/aeroshellhydraulicfluids.pdf

ANEXO J

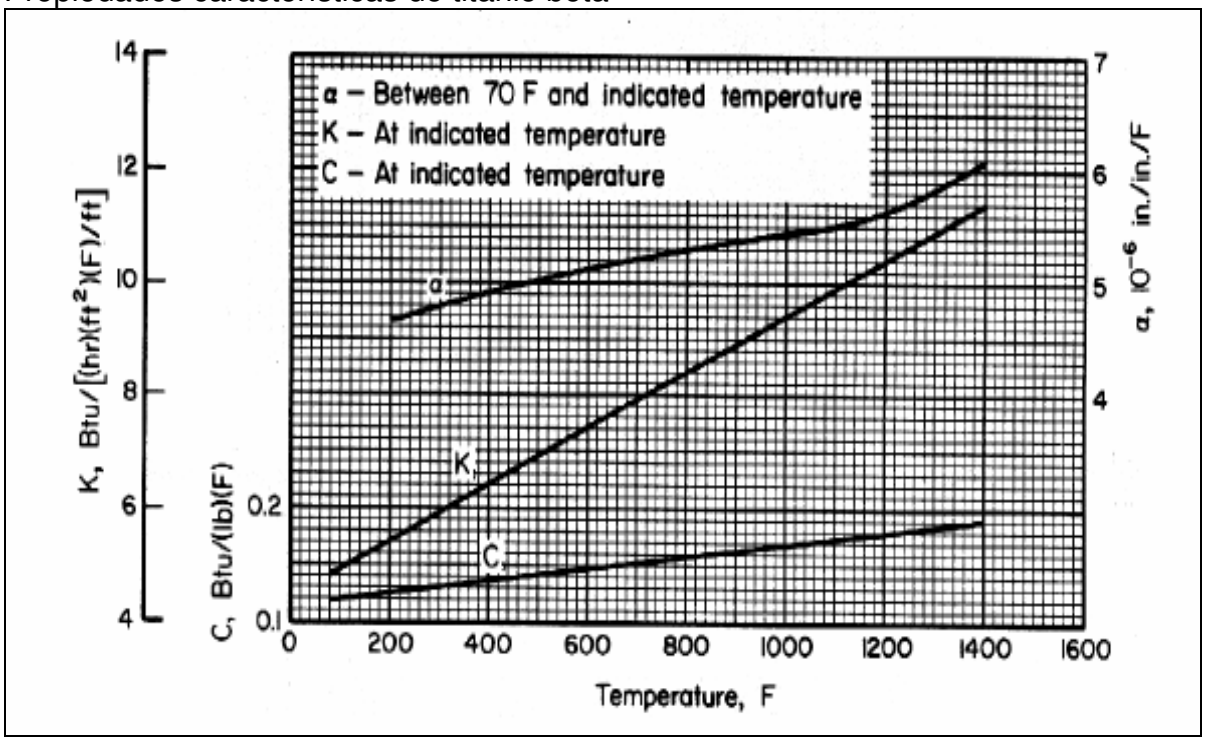
Propiedades de algunos metales y materiales resistentes a altas temperaturas

Propiedades características titanio Alpha.



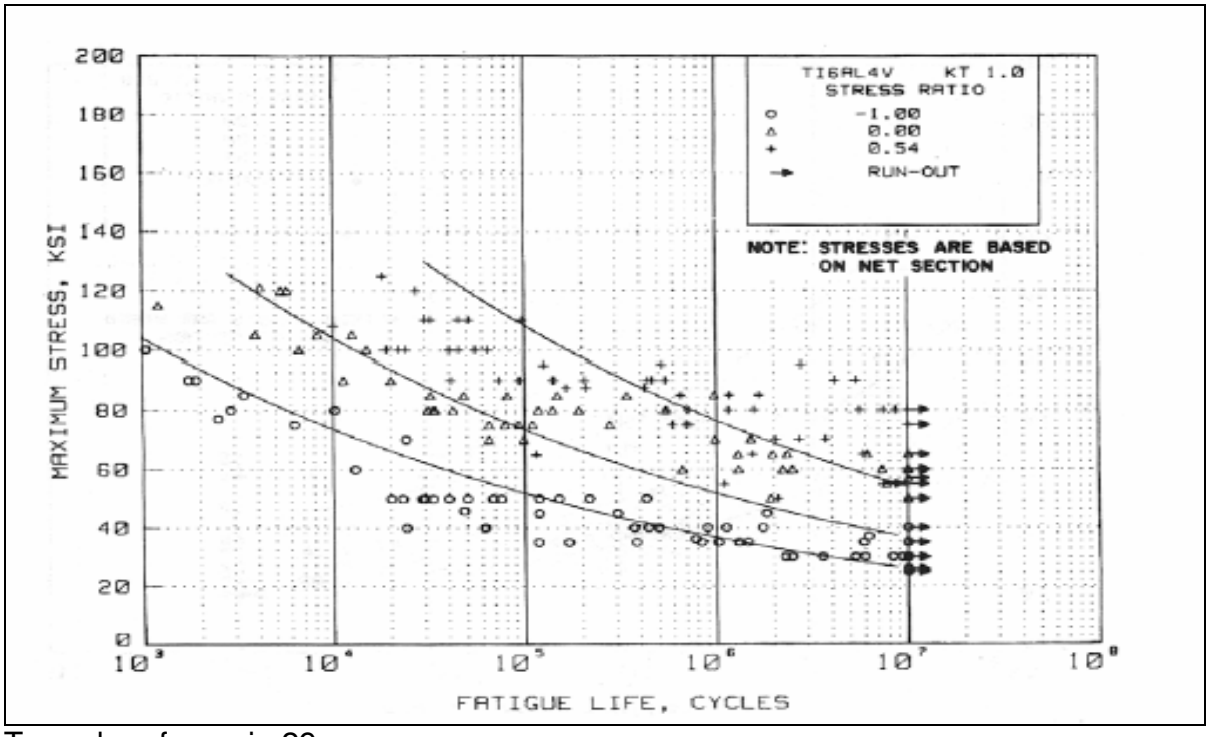
Tomado referencia 29

Propiedades características de titanio beta



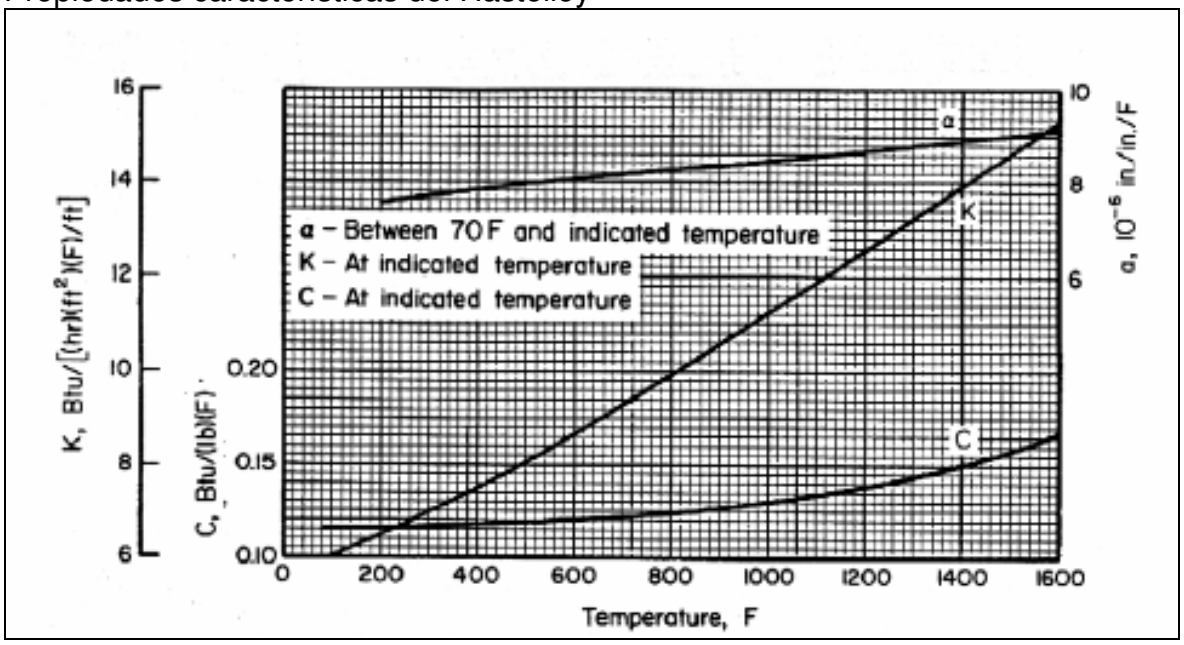
Tomado referencia 29

Análisis de stress material en función de los ciclos



Tomado referencia 29

Propiedades características del Hastelloy



Tomado referencia 29