

**MODELAMIENTO Y SIMULACION DE LA TOBERA UBICADA EN LA TURBINA  
DE VAPOR DEL LABORATORIO DE PLANTAS TERMICAS PARA OBTENER  
PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA DE IMPULSO.**

**JEAN CARLOS BUITRAGO VERA  
WILLIAN AUGUSTO VELANDIA FORERO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**MODELAMIENTO Y SIMULACION DE LA TOBERA UBICADA EN LA TURBINA  
DE VAPOR DEL LABORATORIO DE PLANTAS TERMICAS PARA OBTENER  
PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA DE IMPULSO.**

**JEAN CALOS BUITRAGO VERA  
WILLIAN AUGUSTO VELANDIA FORERO**

**Trabajo de grado para optar al titulo de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
EMIL HERNANDEZ ARROYO  
Ingeniero Mecánico.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

Bucaramanga Junio de 2009

A Dios por haberme permitido culminar con mi carrera, a mis padres Nohora Vera Gallardo y Marcelino Buitrago Silva, por su apoyo incondicional y sacrificio al ofrecerme esta oportunidad de estudiar esta carrera.

Jean Carlos Buitrago Vera.

Primeramente le doy gracias a Dios por haberme permitido culminar con mi carrera, y a los que nunca pueden faltar, a mis padres Rita del Rosario Forero Sandoval y Plutarco Velandia Prada, quienes con sacrificio y humildad me ofrecieron esta oportunidad.

Willian Augusto Velandia Forero

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a todas aquellas personas e instituciones que colaboraron con este proyecto.

Emil Hernández Arroyo, Ingeniero Mecánico y director del proyecto, quien por su capacidad de liderazgo, orientación y seguimiento continuo, nos ha permitido culminar con éxito este proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

Pag.

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCION .....                               | 18 |
| 1 ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO .....            | 19 |
| 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....               | 19 |
| 2.1 JUSTIFICACIÓN .....                          | 20 |
| 3 OBJETIVOS .....                                | 21 |
| 3.1 Objetivo General .....                       | 21 |
| 3.2 Objetivos específicos .....                  | 21 |
| 4 MARCO TEÓRICO .....                            | 22 |
| 4.1 TURBOMAQUINAS .....                          | 22 |
| 4.2 TURBINAS TERMICAS .....                      | 22 |
| 4.2.1 Turbinas a Vapor .....                     | 22 |
| 4.2.1.1 Clasificación Turbinas a Vapor .....     | 23 |
| 4.2.1.1.1 Turbinas de Acción .....               | 23 |
| 4.2.1.1.2 Turbinas de Reacción .....             | 23 |
| 4.2.2 Turbinas a Gas .....                       | 24 |
| 4.2.3 Ciclo Termodinamico .....                  | 24 |
| 4.3 PARTES DE UNA TURBINA .....                  | 26 |
| 4.3.1 Toberas .....                              | 26 |
| 4.3.1.1 Tipos de Toberas .....                   | 31 |
| 4.3.1.1.1 Tobera ISA 1932 .....                  | 31 |
| 4.3.1.1.2 Tobera de Radio Largo .....            | 35 |
| 4.3.1.1.3 Tobera Ventury .....                   | 37 |
| 4.3.1.2 Clasificación de las Toberas .....       | 39 |
| 4.3.1.2.1 Toberas convergentes .....             | 39 |
| 4.3.1.2.2 Toberas convergentes-divergentes ..... | 43 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.1.3 Factores a Tener en Cuenta en una Tobera .....                    | 47 |
| 4.3.1.3.1 Variación de la Velocidad del Fluido con el Area de Flujo ..... | 47 |
| 4.3.1.3.2 Numero de Mach .....                                            | 52 |
| 4.3.1.3.3 Flujo Adiabatico .....                                          | 53 |
| 4.3.1.3.4 Selección de Toberas de Flujo.....                              | 53 |
| 4.3.1.3.5 Eficiencia Isoentropica de las Toberas .....                    | 54 |
| 4.3.1.3.6 Perdidas                                                        | 57 |
| 4.3.1.3.6.1 Perdidas de Choque.....                                       | 57 |
| 4.3.1.3.6.2 Perdidas por Curvatura .....                                  | 57 |
| 4.4 CFX.....                                                              | 57 |
| 4.4.1 Tipos de Modelamiento en CFX .....                                  | 57 |
| 4.4.2 Características de CFX .....                                        | 58 |
| 4.4.3 Estructura ANSYS CFX.....                                           | 58 |
| 4.4.4 Etapas del Proceso de Simulación de CFX.....                        | 59 |
| 4.4.4.1 ANSYS CFX-Pre .....                                               | 59 |
| 4.4.4.2 ANSYS CFX-Solver .....                                            | 59 |
| 4.4.4.3 ANSYS CFX-Post.....                                               | 59 |
| 4.4.4.3.1 Características del CFX-Post .....                              | 59 |
| 4.4.5 Interacción Entre los Módulos Pre-Solver y Post de ANSYS CFX .....  | 60 |
| 4.4.6 Regiones de Flujo en ANSYS CFX .....                                | 60 |
| 4.4.6.1 Dominios .....                                                    | 60 |
| 4.4.6.1.1 Especificaciones Requeridas para el Dominio .....               | 61 |
| 4.4.6.2 Subdominios.....                                                  | 61 |
| 4.4.6.3 Estado Estable y Estado Transitorio.....                          | 61 |
| 4.4.6.4 Turbulencia.....                                                  | 62 |
| 4.4.6.5 Convergencia .....                                                | 62 |
| 5 DISEÑO METODOLOGICO .....                                               | 64 |
| 5.1 ETAPA DE DOCUMENTACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....                             | 64 |
| 5.1.1 Etapa de Recopilación y Selección de la Información.....            | 64 |



|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.2 Estudio de Diseños de Toberas .....                                 | 64 |
| 5.2 PLANEACIÓN.....                                                       | 64 |
| 5.2.1 Identificación de Fuentes de Información.....                       | 65 |
| 5.3 MODELAMIENTO MATEMATICO .....                                         | 65 |
| 5.4 SIMULACION.....                                                       | 65 |
| 5.5 ANÁLISIS.....                                                         | 65 |
| 5.6 INFORME FINAL .....                                                   | 65 |
| 6 ESQUEMA TEMATICO .....                                                  | 66 |
| 6.1 ANALISIS MATEMATICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TOBERA .....             | 66 |
| 6.1.1 Toma de Datos.....                                                  | 66 |
| 6.1.2 Procedimiento Para el Modelo Matematico En (EES). .....             | 66 |
| 6.1.3 Analisis De Resultados De EES.....                                  | 71 |
| 6.2 SIMULACIÓN EN ANSYS CFX .....                                         | 73 |
| 6.2.1 Pasos Para La realización de la Simulación.....                     | 73 |
| 6.2.1.1 Geometría .....                                                   | 73 |
| 6.2.1.2 Enmallado .....                                                   | 74 |
| 6.2.1.3 Preproceso .....                                                  | 75 |
| 6.2.1.3.1 Definición del dominio.....                                     | 76 |
| 6.2.1.3.2 Entrada de la tobera .....                                      | 79 |
| 6.2.1.3.3 Salida de la tobera .....                                       | 80 |
| 6.2.1.3.4 Opciones de solución.....                                       | 81 |
| 6.2.1.4 Solución.....                                                     | 83 |
| 6.2.1.5 Post – Proceso .....                                              | 84 |
| 6.2.1.5.1 Datos de la Primera Simulacion Ansys CFX .....                  | 84 |
| 6.2.1.5.2 Datos de la Segunda Simulacion Ansys CFX con Refinamiento. .... | 87 |
| 6.2.2 Análisis De Resultado De CFX.....                                   | 93 |
| 6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL EES Y EL CFX .....                 | 95 |
| 6.3.1 Análisis de Resultados de la Comparación .....                      | 98 |
| 7 PERSONAS QUE PARTICIPARON DEL PROYECTO .....                            | 99 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 8 CONCLUSIONES ..... | 100 |
| ANEXOS .....         | 103 |

## FIGURAS

Pág.

|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. . Diagrama T-s del ciclo termodinámico de las turbinas de vapor. ....                                                                                                                                | 24 |
| Figura 2. Esquema de una tobera con dos secciones cualquiera 1 y 2 .....                                                                                                                                       | 27 |
| Figura 3. Esquema de una tobera.....                                                                                                                                                                           | 28 |
| Figura 4. . Diagrama T-s en el que se representa una expansión isoentrópica entre dos presiones.....                                                                                                           | 30 |
| Figura 5. Tobera ISA 1932 $d < 2/3 D$ .....                                                                                                                                                                    | 32 |
| Figura 6. Tobera ISA 1932 $d > 2/3 D$ .....                                                                                                                                                                    | 32 |
| Figura 7. Tobera de Radio Alto .....                                                                                                                                                                           | 35 |
| Figura 8. Tobera de Radio Bajo .....                                                                                                                                                                           | 36 |
| Figura 9. Tobera Venturi .....                                                                                                                                                                                 | 38 |
| Figura 10. El efecto de la contrapresión en la distribución de presión a lo largo de una tobera .....                                                                                                          | 39 |
| Figura 11. El efecto de la contrapresión $p_b$ en la relación de flujo de masa $m$ y la presión de salida $p_s$ de una tobera convergente.....                                                                 | 41 |
| Figura 12. La variación de la relación de flujo de masa a través de una tobera con propiedades de estancamiento de entrada. ....                                                                               | 43 |
| Figura 13. Los efectos de la contrapresión en el flujo a través de un tobera .....                                                                                                                             | 46 |
| Figura 14. No es posible obtener velocidades supersónicas uniendo una sección convergente a una tobera convergente. Hacerlo de este modo sólo movería la sección transversal sónica más lejos aguas abajo..... | 50 |
| Figura 15. Variación de las propiedades de flujo en toberas y difusores subsónicos y supersónicos. ....                                                                                                        | 52 |
| Figura 16. Diagrama h-s de los pocesos real y isoentropicos de una tobera adiabatica.....                                                                                                                      | 55 |
| Figura 17. Modulos Ansys CFX.....                                                                                                                                                                              | 58 |

|                                                                                   |                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Figura 18. Interacción entre Módulos.....                                         | 60                                   |
| Figura 19. Calculo de H1 y S1 .....                                               | 67                                   |
| Figura 20. Datos Obtenidos del EES.....                                           | 67                                   |
| Figura 21. Tabla de los datos obtenidos en funcion de los parametros iniciales... | 68                                   |
| Figura 22. Grafica (Presion vs Temperatura) .....                                 | 69                                   |
| Figura 23. Grafica (Presion vs Velocidad).....                                    | 69                                   |
| Figura 24. Grafica Presion vs Relación Area/ Flujo Masico .....                   | 70                                   |
| Figura 25. Grafica (Presion vs Volumen Especifico) .....                          | 70                                   |
| Figura 26. Convergencia no Optima.....                                            | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Figura 27. Tobera (Solid Edge) .....                                              | 73                                   |
| Figura 28. Enmallado de la tobera .....                                           | 74                                   |
| Figura 29. Estadística del proceso de enmallado.....                              | 75                                   |
| Figura 30. Dominios de Frontera.....                                              | 77                                   |
| Figura 31. Dominio de Frontera .....                                              | 78                                   |
| Figura 32. Dominio de Entrada .....                                               | 79                                   |
| Figura 33. Dominio de Salida .....                                                | 80                                   |
| Figura 34. Solución del Sistema.....                                              | 82                                   |
| Figura 35. Convergencia.....                                                      | 83                                   |
| Figura 36. Perfil De Velocidad En CFX .....                                       | 84                                   |
| Figura 37. Perfil de Presion en CFX.....                                          | 84                                   |
| Figura 38. Perfil de Temperatura en CFX .....                                     | 85                                   |
| Figura 39. Perfil de Volumen Especifico en CFX .....                              | 85                                   |
| Figura 40. Perfil de Densidad en CFX.....                                         | 86                                   |
| Figura 41. Imagen de Animacion con Puntos en CFX.....                             | 86                                   |
| Figura 42. Enmallado para la segunda Simulacion con Refinamiento .....            | 87                                   |
| Figura 43. Convergencia del modelo Refinado para la segunda Simulacion .....      | 87                                   |
| Figura 44. Grafica Area Seccion Transversal de la Tobera.....                     | 88                                   |
| Figura 45. Grafica de Presion en la Tobera .....                                  | 89                                   |
| Figura 46. Perfil De Presion para Modelo Refinado .....                           | 89                                   |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 47. Grafica Velocidad en la Tobera.....                                           | 90  |
| Figura 48. Perfil de Velocidad para Modelo Refinado. ....                                | 90  |
| Figura 49. Perfil de Temperatura para Modelo Refinado. ....                              | 91  |
| Figura 50. Perfil de Volumen Especifico para Modelo Refinado. ....                       | 91  |
| Figura 51. Perfil de Densidad para Modelo Refinado.....                                  | 92  |
| Figura 52. Imagen de Animacion en Plano CFX. ....                                        | 92  |
| Figura 53. Comparacion de Resultados de Velocidad .....                                  | 95  |
| Figura 54. Comparacion de Resultados de Volumen.....                                     | 96  |
| Figura 55. Comparacion de Resultados de Temperatura.....                                 | 97  |
| Figura 56. Plataforma del Programa en Matlab de la Tobera.....                           | 125 |
| Figura 57. Grafica de Matlab ( Presion vs Velocidad) .....                               | 126 |
| Figura 58. Gráfica de Matlab (Presion Vs Volumen especifico) .....                       | 126 |
| Figura 59. Grafica de Matlab (Presion vs Relacion Area/Flujo masico). ....               | 127 |
| Figura 60. Grafica de Matlab (Volumen Especifico vs Relacion Area/Flujo Masico)<br>..... | 127 |
| Figura 61. Gráfica. (Presion vs Relacion Area / Flujo Masico) .....                      | 128 |

## TABLAS

Pag.

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Datos de la Turbina .....                                       | 66 |
| Tabla 2. Tomado de Ansys CFX 11.0 User's guide: Judging Convergence..... | 81 |
| Tabla 3. Resultados de la Simulacion .....                               | 88 |

## LISTA DE ANEXOS

Pag.

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| ANEXO A (PLANO DE LA TURBINA).....                            | 103 |
| ANEXO B (PLANO BASE DE LA TOBERA).....                        | 104 |
| ANEXO C (PLANO PERFIL DE LA TOBERA).....                      | 105 |
| ANEXO D (FOTOS DE LA TURBINA).....                            | 106 |
| ANEXO E (FOTOS DE LA TOBERA).....                             | 108 |
| ANEXO F (CALCULOS).....                                       | 109 |
| ANEXO G (REPORTE DE LA SOLUCION ANSYS CFX).....               | 113 |
| ANEXO H. (CODIGO PARA LA FUNCION DE LA TOBERA EN MATLAB)..... | 117 |
| _ANEXO I. (CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES).....                    | 129 |

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:**

MODELAMIENTO Y SIMULACION DE LA TOBERA UBICADA EN LA TURBINA DE VAPOR DEL LABORATORIO DE PLANTAS TERMICAS PARA OBTENER PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA DE IMPULSO.

**AUTOR(ES):**

Jean Carlos Buitrago Vera

William Augusto Velandia Forero

**FACULTAD:**

Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):**

Emil Hernández Arroyo

### **RESUMEN**

El proyecto pretende modelar y simular la tobera ubicada en la turbina de vapor del laboratorio de plantas térmicas de la UPB con el propósito de conocer y determinar el comportamiento de la tobera y la turbina. El proyecto se conforma de tres etapas principales, la primera etapa contempla un diseño matemático en la que se estudiarán las fórmulas que permiten predecir el comportamiento de la tobera bajo distintos parámetros de funcionamiento. La segunda etapa se modelará la tobera en Solid Edge y por último se simulará la tobera en ANSYS CFX con el propósito de interpretar, analizar y posteriormente comparar los datos obtenidos en esta simulación con los cálculos realizados en la primera etapa.

Este estudio nos permitirá analizar el modelamiento térmico, estructural y el fluido dinámico de la tobera. El estudio estará supervisado por el ingeniero Emil Hernández Arroyo.

### **PALABRAS**

**CLAVES:**

MODELAMIENTO,SIMULACION,TOBERA,TURBINA.



## **ABSTRACT**

TITULO:

MODELING AND SIMULATION OF NOZZLE LOCATED IN THE LABORATORY OF STEAM TURBINE PLANT THERMAL PARAMETERS FOR OBTAINING PERFORMANCE OF IMPULSE TURBINE.

AUTOR(ES):

Jean Carlos Buitrago Vera

Willian Augusto Velandia F

FACULTAD:

Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A):

Emil Hernández Arroyo

## **RESUMEN**

The project pretend modeling and simulate the nozzle located in the steam turbine of laboratory of thermal plants of the UPB with the purpose of know and determine the behavior of the nozzle and turbine.

The project conforms of three main stages, the first stage contemplates a mathematical design where we will study the formulates allowing predict the performance of the nozzle under different parameters of operation. In the second stage we will model the nozzle in solid edge and finally we will simulate the nozzle in ANSYS CFX with the purpose the interpret, analyze and later compare the dates obtained in this simulation with the calculus done in the first stage.

This study will allow us to analyze the modeling thermal and structural and thermodynamic fluid of the nozzle. The study will be overseen by the engineer Emil Hernandez Arroyo.

KEYWORDS:

MODELING, SIMULATE, NOZZLE, TURBINE

## INTRODUCCION

Una Tobera es un dispositivo que aumenta o disminuye la aceleración de un fluido. Este dispositivo es muy utilizado en la ingeniería mecánica el cual tiene la capacidad de transformar energía (acelera o desacelera fluidos). Estas propiedades son muy utilizados como en:

Turbinas de gas y vapor

Túneles de viento

Medidores de flujo

Sistemas de propulsión a chorro: cohetes y aviones

Este proyecto se contempla por la necesidad de conocer el comportamiento en que actualmente está operando la tobera de la turbina ubicada en el laboratorio de maquinas hidráulicas de la Universidad Pontificia Bolivariana. Esta simulación y modelamiento nos permitirá saber detalladamente por medio de sus graficas realizadas por matlab y resultados que obtendremos de la simulación .

## **1 ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO**

MODELAMIENTO Y SIMULACION DE LA TOBERA UBICADA EN LA TURBINA DE VAPOR DEL LABORATORIO DE PLANTAS TERMICAS PARA OBTENER PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA DE IMPULSO.

## **2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La necesidad de conocer y determinar el comportamiento de la tobera ubicada en las instalaciones del laboratorio de plantas térmicas UPB, debido a que no existe una base de datos que nos ayude a interpretar el funcionamiento de una tobera en condiciones ideales.

El estudio que se llevara a cabo en la tobera, nos dará una amplia información sobre el comportamiento de esta, bajo los diferentes parámetros de funcionamiento en la que se encuentra trabajando, para posteriormente realizar los respectivos análisis y compararlos con los datos obtenidos en la simulación.

Con este estudio se pretende que el estudiante de ingenierías de la UPB, tenga acceso a una información detallada sobre los parámetros de funcionamiento de la tobera.

## **2.1 JUSTIFICACIÓN**

Este proyecto se origina por la necesidad de conocer el comportamiento de la tobera y determinar su eficiencia debido a que actualmente se quiere mejorar la eficiencia de la turbina de vapor, y la tobera es un elemento muy importante de esta instalación.

La importancia de este proyecto radica en el estudio que se va a realizar, ya que nos permitirá determinar matemáticamente las condiciones en las cuales está actualmente operando la tobera. Para corroborar los resultados se utilizara ansys el cual nos permitirá conocer de manera grafica los resultados.

El análisis de la tobera nos permitirá tomar decisiones para mejorar su eficiencia. Actualmente este proyecto no tiene ninguna clase de antecedentes ya que en la facultad de ingeniería mecánica no se ha realizado ninguna propuesta relacionada con este tema.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo General**

Modelar y analizar el comportamiento de la tobera ubicada en la turbina de vapor del laboratorio de plantas térmicas. Este análisis se llevara a cabo en ANSYS CFX simulando el perfil de la sección transversal, velocidad, análisis térmicos y volumen específico. Con el propósito de interpretar los datos obtenidos, y determinar la eficiencia de la tobera.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Modelar matemáticamente la tobera para conocer su comportamiento. Resultado: Modelo matemático de la tobera, y las curvas de desempeño en condiciones isoentrópicas. Indicador: El modelo matemático esta soportado en principios termodinámicos.

Simular en Ansys CFX la tobera bajo los parámetros establecidos de funcionamiento. Resultado: Se obtendrá un análisis detallado del comportamiento de la tobera (perfil de la sección transversal, velocidad, volumen específico y análisis térmico). Indicador: los resultados de esta simulación permitirán corroborar los datos obtenidos en el modelamiento matemático.

Determinar la eficiencia de la tobera y turbina según parámetros de desempeño Resultado: Eficiencia de la turbina Indicador: El cálculo se fundamenta en las ecuaciones de Euler para el intercambio de energía entre el vapor y el alabe de la turbina.

## **4 MARCO TEÓRICO**

### **4.1 TURBOMAQUINAS**

Una Turbomáquina es un aparato en el cual el movimiento de un fluido no confinado se altera y transmite potencia desde o hacia un eje, o crea un empuje de propulsión.

Considerando las máquinas que transmiten potencia desde un eje hacia el fluido son:

- Bomba
- Compresor
- Ventilador
- Soplador

Las que transfieren potencia del fluido al eje se denominan turbinas. [9]

### **4.2 TURBINAS TERMICAS**

#### **4.2.1 Turbinas a Vapor**

Una turbina de vapor es una turbomáquina motora, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (entiéndase el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético. Las turbinas de vapor están presentes en diversos ciclos de potencia que utilizan un fluido que pueda cambiar de fase, entre éstos el más importante es el Ciclo Rankine, el cual genera el vapor en una caldera, de la cual sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que, típicamente, es aprovechada por un generador para producir electricidad.[8]

En una turbina se pueden distinguir dos partes, el rotor y el estator. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estator también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina. El término turbina de vapor es muy utilizado para referirse a una máquina motora la cual cuenta con un conjunto de turbinas para transformar la energía del vapor, también al conjunto del rodete y los álabes directores.[8]

#### **4.2.1.1 Clasificación Turbinas a Vapor**

Existen las turbinas de vapor en una gran variedad de tamaños, desde unidades de 1 hp (0.75 Kw) usadas para accionar bombas, compresores y otro equipo accionado por flecha, hasta turbinas de 2, 000,000 hp (1, 500,000 Kw) utilizadas para generar electricidad. Hay diversas clasificaciones para las turbinas de vapor modernas, y por ser turbo máquinas son susceptibles a los mismos criterios de clasificación de éstas. Por otro lado, es común clasificarlas de acuerdo a su grado de reacción: [8]

##### **4.2.1.1.1 Turbinas de Acción**

El cambio o salto entálpico o expansión es realizada en los álabes directores o las toberas de inyección si se trata de la primera etapa de un conjunto de turbinas, estos elementos están sujetos al estator. En el paso del vapor por el rotor la presión se mantendrá constante y habrá una reducción de la velocidad. [8]

##### **4.2.1.1.2 Turbinas de Reacción**

La expansión, es decir, el salto entálpico del vapor puede realizarse tanto en el rotor como en el estator, cuando este salto ocurre únicamente en el rotor la turbina se conoce como de reacción pura.[8]

#### 4.2.2 Turbinas a Gas

En este tipo de turbinas no se espera un cambio de fase del fluido durante su paso por el rodete. [8]

#### 4.2.3 Ciclo Termodinámico

El principio de funcionamiento de las turbinas de vapor tiene su fundamento en el ciclo termodinámico conocido como Ciclo Rankine, al final del cual el fluido de trabajo retorna a su estado y composición inicial. Cuatro procesos se distinguen en un Ciclo Rankine ideal. Figura 1: [8]

1-2. Proceso de bombeo adiabático y reversible.

2-3. Transferencia de calor al fluido de trabajo en una caldera a presión constante.

3-4. Expansión adiabática y reversible del fluido en la turbina.

4-5. Transferencia de calor desde el fluido de trabajo a presión constante en el condensador. [8]

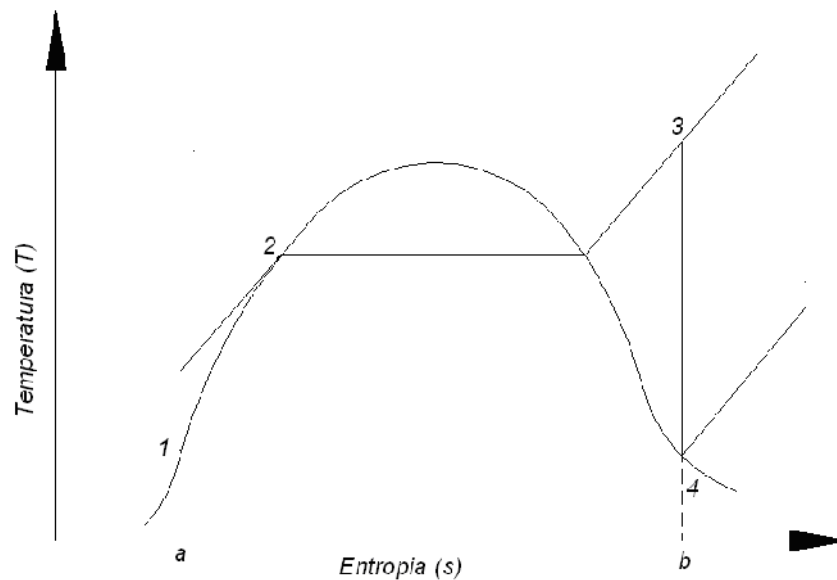


Figura 1. . Diagrama T-s del ciclo termodinámico de las turbinas de vapor.



Si los cambios en la energía cinética y potencial (presión y temperatura) del fluido de trabajo no son considerados, el calor transferido y el trabajo pueden representarse por áreas en el diagrama. El área comprendida por los puntos a-1-2-3-b-a representa el calor transferido al fluido de trabajo, mientras que el área comprendida por los puntos a-1-4-b-a representa el calor transferido desde el sistema. El trabajo neto realizado está representado por el área comprendida por los puntos 1-2-3-4-1 y es la diferencia entre el calor transferido al fluido de trabajo y el calor transferido desde el fluido de trabajo. [8]

La relación entre el calor transferido al fluido de trabajo ( $q_A$ ) por unidad de masa y el trabajo neto realizado ( $W_{net}$ ) por unidad de masa se conoce como eficiencia térmica, ver Ecuación 1: [8]

$$\eta = \frac{W_{net}}{q_A}$$

**Ecuación 1**

$$\eta = \frac{q_A - q_L}{q_A}$$

**Ecuación 2.**

## 4.3 PARTES DE UNA TURBINA

### 4.3.1 Toberas

Un dispositivo que aumenta la velocidad de un fluido a expensas de la presión el área de sección transversal de una tobera disminuye en la dirección del flujo en el caso de flujos subsónicos y aumenta en el caso cuando son flujos supersónicos lo contrario es cierto para los difusores. [2]

La tasa de transferencia de calor entre el fluido que circula por una tobera y los alrededores suelen ser muy pequeñas ( $q=0$ ) debido a que el fluido tiene altas velocidades y no pasa el tiempo suficiente en el dispositivo para que haya lugar a cualquier transferencia de calor significativa es típico que en las toberas o en los difusores no se efectúe trabajo ( $W=0$ ) y que cualquier cambio en la energía potencial sea despreciable ( $ep=0$ ). [6]

Pero como las toberas y los difusores implican altas velocidades, cuando los fluidos pasan por ellos experimentan grandes cambios en su velocidad. [6]

Las toberas se fabrican generalmente de acero inoxidable o de acero al cromo molibdeno. El acabado de la superficie en contacto con el fluido del orden de 6 a 10 micropulgadas ha dado como resultado mayor predicción de los coeficientes de descarga y una excelente repetibilidad. la salida o lado de descarga de la tobera se bisela con un ángulo de 10 grados. [9]

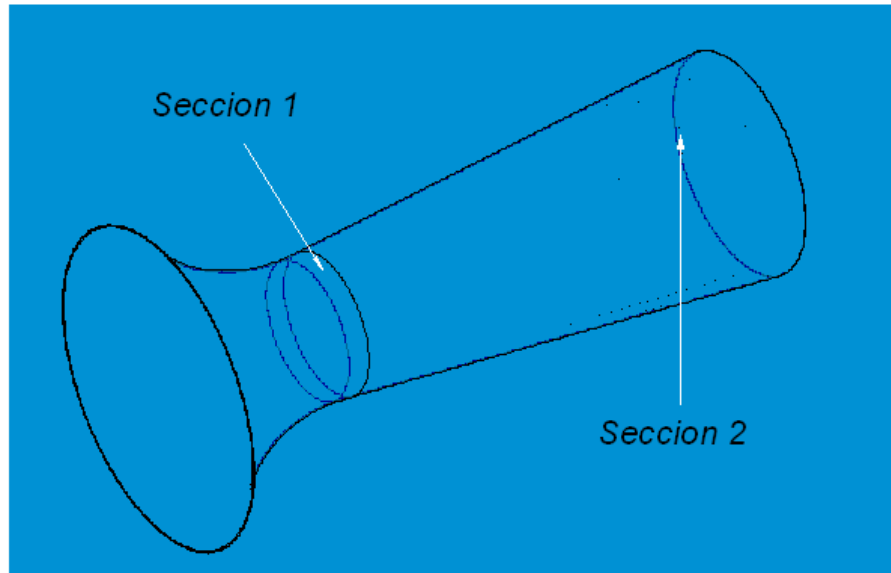
Cuando la presión en la dirección del flujo se incrementa, a costa de una reducción en la velocidad del mismo el dispositivo se denomina difusor. [4]

La forma de una tobera depende de la velocidad y las características del fluido que circula por ella. De acuerdo a la ecuación de flujo estable y considerando que en

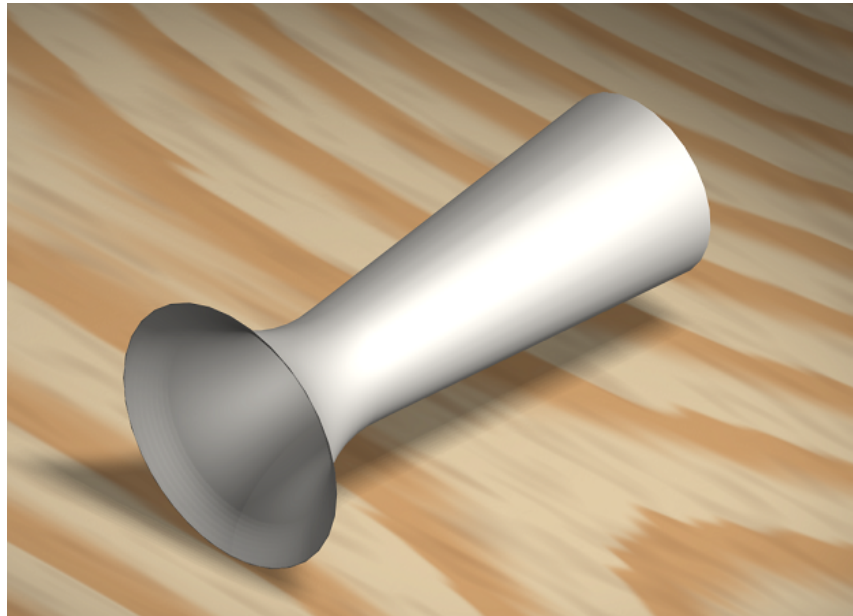
el caso particular de las toberas, el trabajo mecánico desarrollado es igual a cero, puede decir que la siguiente ecuación 3 es aplicable entre dos secciones cualquiera de la tobera identificadas como 1 y 2. vease figura 2. [6]

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} + Q = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

**Ecuación 3**



**Figura 2. Esquema de una tobera con dos secciones cualquiera 1 y 2**



**Figura 3. Esquema de una tobera**

Para efectos de análisis se considera que es un proceso adiabático reversible, por lo tanto encontramos la ecuación 4 : [6]

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

**Ecuación 4.**

En la ecuación 5 vemos como es la velocidad en la sección 2, al encontrarse despejado ( $V_2$ ) de la ecuación 4, así: [6]

$$V_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + V_1^2}$$

**Ecuación 5.**

Para la ecuación 6 vemos como para gases ideales es,  $h = CpT$ , puede decirse que:[6]

$$V_2 = \sqrt{2C_p(T_1 - T_2) + V_1^2}$$

**Ecuación 6.**

De la ecuación de continuidad el área de cualquier sección de la tobera es: [6]

$$A = \frac{\dot{m}v}{V}$$

**Ecuación 7**

Siendo:

(A) área perpendicular a la dirección del flujo.

( $\dot{m}$ ) flujo másico.

(v) volumen específico.

(V) velocidad del flujo.

Para vapor hay que verificar si se encuentra por debajo de la línea de saturación o si es vapor saturado. Cuando el proceso de expansión ocurre por debajo de la línea de saturación, parte del vapor se condensaría y en este caso se tiene en cuenta la porción seca del vapor, definida por la calidad (x).

Por lo tanto la anterior expresión se puede escribir como la ecuación 8 . [6]

$$A = \frac{\dot{m}xv}{V}$$

**Ecuación 8**

Como V es igual a  $V_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + V_1^2}$  entonces nuestra ecuación 9 nos queda de la siguiente forma:

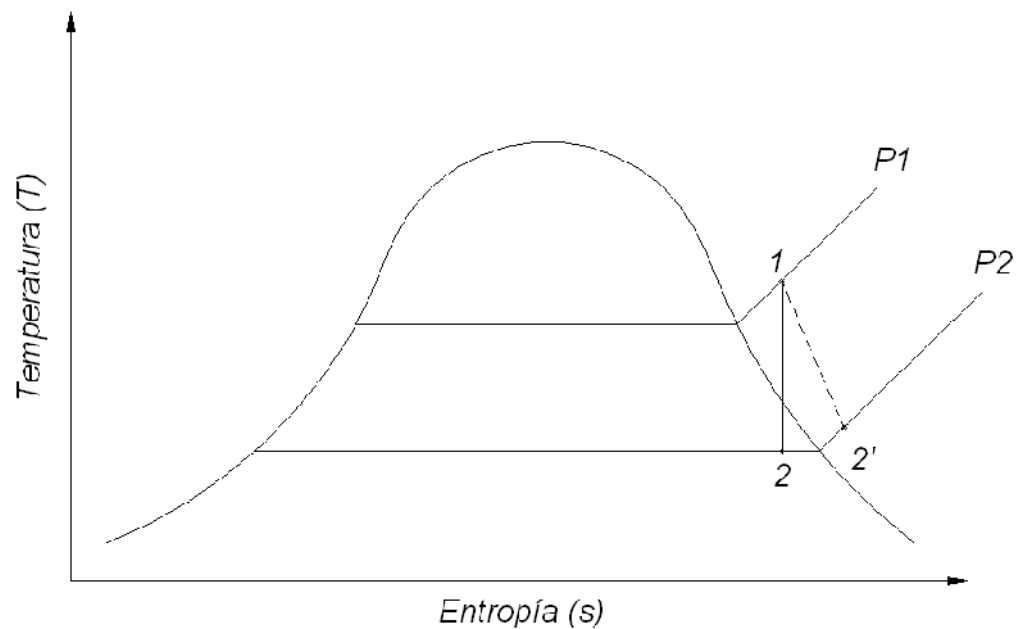
$$\frac{A}{\dot{m}} = \frac{xv}{\sqrt{2(h_1 - h_2) + V_1^2}}$$

**Ecuación 9.**

Como se explicará más adelante, un proceso de expansión de vapor en una tobera, puede partir desde la región de vapor sobrecalentado hasta la región comprendida por debajo de la línea de saturación sin que el vapor se condense. Este proceso se conoce como expansión supersaturada. Para expansiones supersaturadas y casos en los que el vapor está saturado o sobrecalentado, la calidad equivale a 1, siendo la ecuación 10 el resultado de: [5]

$$\frac{A}{\dot{m}} = \frac{v}{\sqrt{2(h_1 - h_2) + V_1^2}}$$

**Ecuación 10**



**Figura 4. . Diagrama T-s en el que se representa una expansión isoentrópica entre dos presiones**

A pesar de que se puede calcular el área para cualquier presión intermedia, no puede determinarse el perfil o forma de la tobera a lo largo de su eje longitudinal.

El diseño del perfil de la tobera depende de cómo cae la presión a lo largo de su longitud y a su vez la variación de la presión depende del perfil de la tobera. Considerando que la caída de presión es uniforme a lo largo de la tobera, puede calcularse la variación del área transversal, velocidad y volumen específico para el vapor o gas que fluye a través de ella. [5]

#### **4.3.1.1 Tipos de Toberas**

Hay dos tipos estándar de toberas:

- La ISA 1932
- La tobera de radio largo. [11]

Cada una de estas es diferente y son descritas a continuación:

##### **4.3.1.1.1 Tobera ISA 1932**

En las Toberas ISA 1932 encontramos que existen dos clase: Una clase a que la visualiamos en la figura 5 y la clase b que la visualizamos en la figura 6. [11]





La figura 6 muestra la sección transversal de una tobera ISA 1932 en un corte. La siguiente información de este texto se refiere a dicha grafica.

La parte de la tobera en el interior de la tubería es circular. La tobera consiste de una sección convergente, un perfil redondeado, y una garganta cilíndrica. [11]

El perfil de la tobera puede ser caracterizada por lo siguiente:

- Una pared plana parte A, perpendicular al eje, una sección convergente definida por dos arcos de circunferencia B y C
- Una garganta cilíndrica E, y un reborde F el cual se requiere si esta es maquinada ala esquina F.
- La pared plana parte A es limitada por una circunferencia centrada en a de revolución, con un diámetro de  $1.5d$  y por el interior de una circunferencia de la tubería, de diámetro  $D$ . Cuando  $d=2D/3$  la distancia radial de esta parte es cero. Cuando  $d$  es mayor que  $2D/3$ , la cara de la parte superior de la tobera no incluye una parte plana interna dentro de la tubería. En este caso, la tobera es manufacturada como si  $D$  fuera mayor que  $1.5d$  y la pared plana interna es entonces retirada ya que el mayor diámetro del perfil convergente es igual a  $D$ . [11]

El arco de la circunferencia B es tangencial a la parte plana A cuando  $d < 2D/3$  mientras que su radio  $R1$  es igual a  $0.2d \pm 10\%$  para  $\beta < 0.5$  y es igual a  $0.2d \pm 3\%$  para  $\beta > 0.5$ . Su centro estaba a  $0.2d$  del plano interno y a  $0.75d$  del eje.

El arco de la circunferencia C es tangencial al arco de circunferencia B y a la garganta E. Su radio  $R2$  es igual a  $d/3 \pm 10\%$  par  $\beta < 0.5$  y es igual a  $d/3 \pm 3\%$  para  $\beta \geq 0.5$  su centro esta a  $d/2 + d/3 = 5d/6$  desde el eje y la ecuacion 11 tenemos que a es igual :

$$a = \frac{12 + \sqrt{39}}{60} d = 0.3041d$$

**Ecuación 11.**

La garganta E tiene un diámetro  $d$  y una longitud  $b = 0.3d$ . La garganta debe ser cilíndrica. El reborde F tiene un diámetro  $c$  igual  $1.006d$  y una longitud menor o igual a  $0.03d$ . [11]

La longitud total de la tobera, excluyendo el reborde F, es  $0.6041d$  cuando  $d$  es menor o igual a  $2D/3$  y mas corto, debido al perfil interno, si  $d$  es mayor que  $2D/3$ . La longitud total de la tobera sin incluir el reborde, como una función de  $\beta$  es igual a la ecuacion 12 presentada abajo:

**$0.6041d$  para  $0.3 \leq \beta \leq 2/3$  Y**

$$\left[ 0.4041 + \left[ \frac{0.75}{\beta} - \frac{0.25}{\beta^2} - 0.5225 \right]^{1/2} \right] d \text{ para } 2/3 < \beta \leq 0.8$$

**Ecuación 12.**

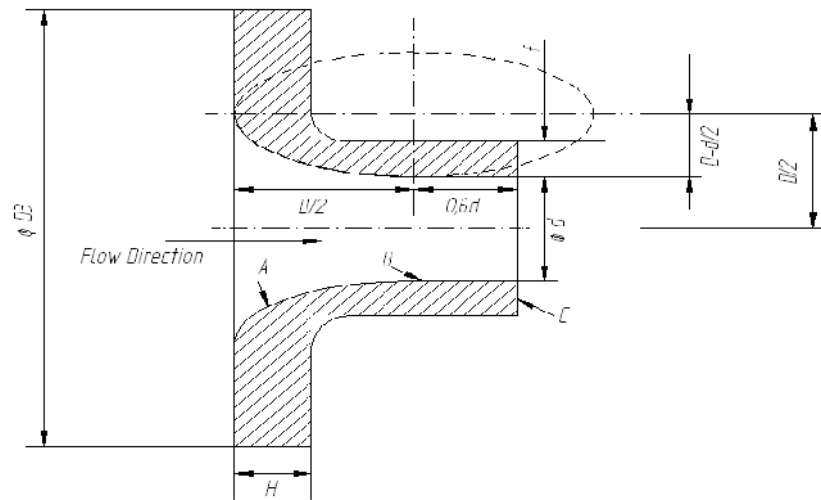
La superficie de la cara superior y la garganta deben tener un acabado superficial con un criterio de rugosidad de  $R_a \leq 10^{-4} d$

En la parte inferior, el espesor  $H$  no debe exceder  $0.1D$ . Aparte de las condiciones anteriores el perfil y el acabado superficial de la cara inferior no se han especificado. [11]

#### 4.3.1.1.2 Tobera de Radio Largo

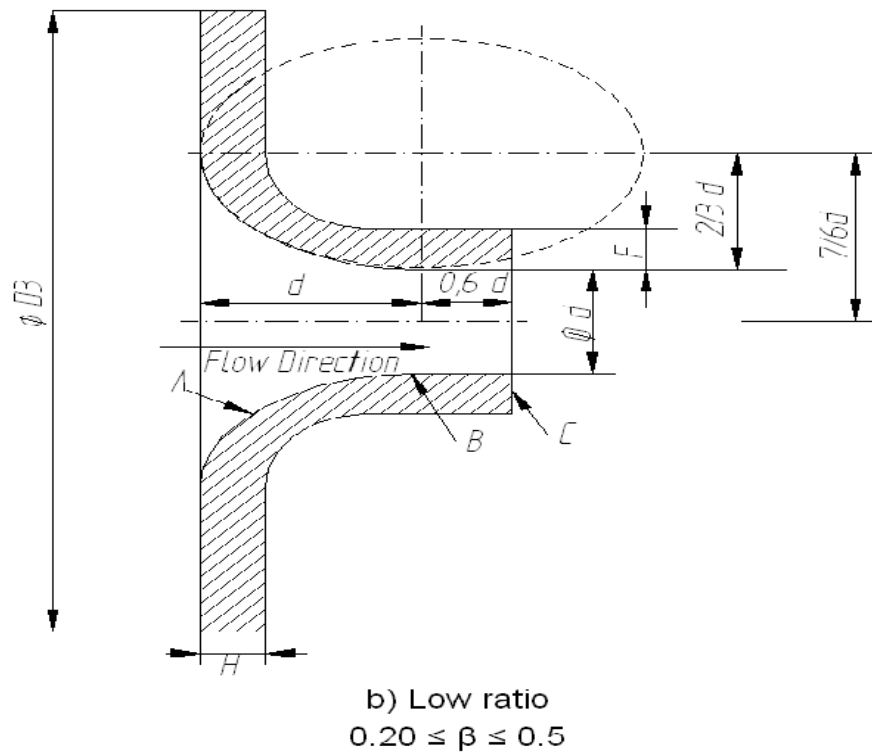
Hay dos tipos de longitud de radio:

- Tobera de radio alto ( $0.25 \leq \beta \leq 0.8$ ), figura 7.
- Tobera de radio bajo ( $0.20 \leq \beta \leq 0.5$ ), figura 8 .



a) High ratio  
 $0.25 \leq \beta \leq 0.8$

**Figura 7. Tobera de Radio Alto**



**Figura 8. Tobera de Radio Bajo**

Para valores de  $\beta$  entre 0.25 y 0.5 ambos diseños pueden ser usados estas figuras 7 y 8 ilustran la longitud de los radios muestra la sección transversal en la dirección de flujo de una tubería. Los párrafos siguientes se refieren a esta figura 8. Ambos tipos de toberas consisten en una sección convergente, cuya forma es un cuarto elipse, y una garganta cilíndrica esta parte de la tobera la cual es interna a la tubería debe ser circular. [11]

La parte interior a la tubería se caracteriza por una sección convergente A, una garganta cilíndrica B y una sección C. La sección convergente A tiene la forma de un cuarto de elipse. El centro de la elipse esta  $D/2$  del eje axial. La línea mayor de la elipse es paralela al eje axial. El valor de la mitad del eje mayor es  $D/2$ . El valor de la mitad del eje menor es  $(D - d)/2$ . [11]

La garganta B tiene un diámetro  $d$  y una longitud  $0.6d$ . La garganta debe ser cilíndrica. Hacer medidas en suficiente número en la sección transversal se debe hacer para determinar que bajo ninguna circunstancia la garganta es divergente en la dirección del flujo. La distancia entre las paredes de la tubería y la cara externa de la garganta debe ser mayor o igual a 3mm. El espesor  $H$  debe ser mayor o igual a 3mm o menor o igual a  $0.15D$ . El espesor  $F$  de la garganta debe estar entre 3mm y 13mm. La superficie de la parte interior debe tener un criterio de rugosidad de  $R_a \leq 10^{-4} d$ . [11]

Los requerimientos dados para la tobera de radio alto se aplica también para la tobera de radio bajo, con la excepción de la forma de la elipse la cual es definida a continuación. La sección convergente A tiene la forma de un cuarto de elipse. El centro de la elipse esta a una distancia  $d/2 + 2d/3 = 7d/6$  desde el eje. El eje mayor de la elipse es paralelo al eje axial de la tobera. El valor de la mitad del eje mayor es  $d$ . El valor de la mitad del eje menor es  $2d/3$ . [11]

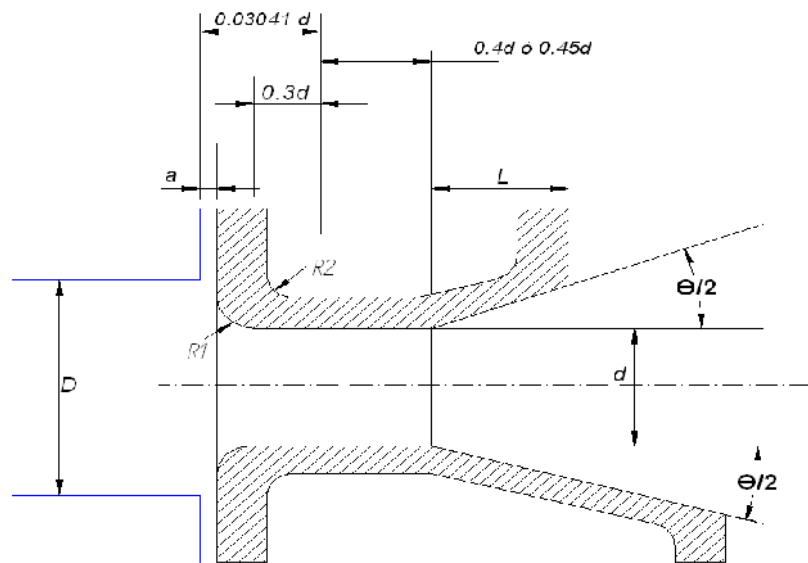
#### **4.3.1.1.3 Tobera Ventury**

El perfil que se muestra en la figura 9 ,consiste de una sección convergente, con un perfil redondeado, una garganta cilíndrica y una sección divergente. Las caras de la parte superior es igual a la ISA1932 por lo tanto la descripción hecha, esta se aplica de igual forma a esta parte. [11]

La garganta consiste de una parte E de una longitud de  $0.3d$  que es la misma para la tobera ISA 1932 y una parte  $E^1$  de una longitud de  $0.4d$  a  $0.45d$ . La garganta debe ser cilíndrica. La sección divergente debe ser conectada con la parte  $E^1$  de la garganta pero sin unión redondeada, cualquier partícula debe ser removida. [11]

El ángulo  $\phi$  debe ser menor o igual a  $30^\circ$ . La longitud de la sección divergente no tiene prácticamente ninguna influencia en el coeficiente de descarga  $C_d$ . puede ser truncada o no. La superficie interna de la tobera venturi debe tener un criterio de rugosidad  $R_a \leq 10^{-4} d$ . [11]

La tobera venturi puede fabricarse de cualquier material siempre y cuando mantenga sus características durante su uso. Es usualmente hecho de metal y debe ser protegido contra la corrosión y la erosión. [11]



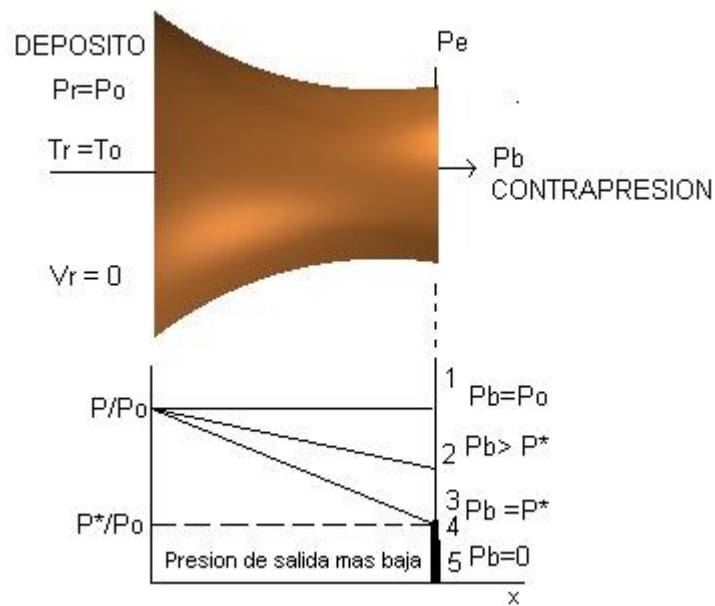
*Tobera Venturi*

**Figura 9. Tobera Venturi**

### 4.3.1.2 Clasificación de las Toberas

#### 4.3.1.2.1 Toberas convergentes

Considere el flujo subsónico a través de la tobera convergente mostrada en la figura 10. La entrada de la tobera está unida a un depósito a presión  $p_r$  y temperatura  $T_r$ . El depósito es lo suficientemente grande de manera que la velocidad a la entrada de la tobera es despreciable. Puesto que la velocidad del fluido en el depósito es cero y el flujo a través de la tobera es isentrópico, la presión de estancamiento y la temperatura de estancamiento del fluido en cualquier sección transversal a lo largo de la tobera son iguales a la presión y temperatura del depósito, respectivamente. [10]



**Figura 10. El efecto de la contrapresión en la distribución de presión a lo largo de una tobera**

Luego se empieza a reducir la contrapresión y observamos los efectos resultantes en la distribución de presión a lo largo de la longitud de la tobera, como se muestra en la figura 10. Si la contrapresión  $p_b$  es igual a  $p_1$ , la cual a su vez es igual a  $p_r$ , no habrá distribución de flujo y de presión que resulten uniformes a lo largo de la tobera. Cuando la contrapresión se reduce a  $p_2$ , la presión del plano de

salida  $p_s$  también se reduce a  $p_2$ . Esto causa que la presión a lo largo de la tobera disminuya en la dirección del flujo. [10]

Cuando la contrapresión se reduce a  $p_3 (= p^*$  , que es la presión necesaria para aumentar la velocidad de fluido hasta la velocidad del sonido en el plano de salida o la garganta), el flujo de masa alcanza un valor máximo y se dice que el flujo estará estrangulado. Una reducción adicional de la contrapresión al nivel  $p_4$  o menor no produce cambios adicionales en la distribución de presión a lo largo de la longitud de la tobera. [10]

En condiciones de flujo permanente, la relación de flujo de masa a través de la tobera es constante y puede expresarse como lo define la ecuacion 13.

$$\dot{m} = \rho AV = \left( \frac{p}{RT} \right) A (M \sqrt{kRT}) = pAM \sqrt{\frac{k}{RT}}$$

**Ecuación 13**

Al sustituir T, se tiene que la ecuacion 14 es la siguiente:

$$\dot{m} = \frac{AMp_0 \sqrt{k/(RT_0)}}{\left[ 1 + (k-1)M^2/2 \right]^{(k+1)/[2(k-1)]}}$$

**Ecuación 14.**

De modo que la relación de flujo de masa de un fluido particular a través de una tobera , es función de las propiedades de estancamiento  $T_0$  y  $p_0$  especificadas, la relación de flujo de masa máxima puede determinarse diferenciando la ecuación 14 respecto de  $M$  y haciendo el resultado igual a cero. Esto produce  $M=1$ . Como el

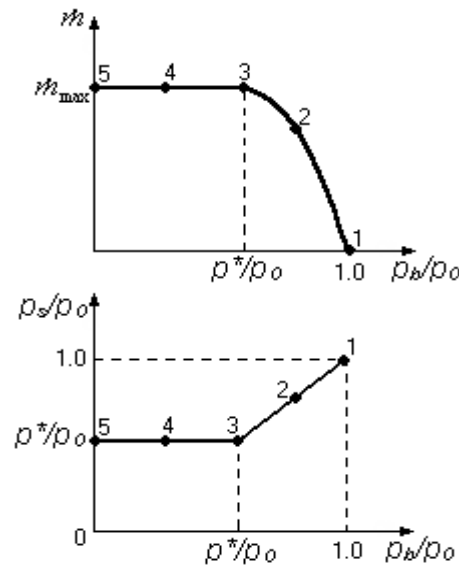


único punto en una tobera donde el número de Mach puede ser la unidad es el lugar de área de flujo mínima (la garganta) ver figura 14, la relación de flujo de masa a través de la tobera será máxima cuando  $M=1$  en la garganta. Denotando esta área mediante  $A^*$ , se obtiene una expresión para la relación de flujo de masa máxima sustituyendo  $M=1$  en la ecuación 14: [10]

$$\dot{m}_{\max} = A^* P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/[2(k-1)]}$$

**Ecuación 15.**

La relación de flujo puede controlarse cambiando la presión o la temperatura de estancamiento, por lo que una tobera convergente puede utilizarse como medidor de flujo. La relación de flujo también puede controlarse, desde luego, variando el área de garganta. [10]



**Figura 11. El efecto de la contrapresión  $p_b$  en la relación de flujo de masa  $m$  y la presión de salida  $p_s$  de una tobera convergente.**

La gráfica de  $m$  contra  $p_b/p_0$  para una tobera convergente se muestra en la figura 11. Advierta que la relación de flujo de masa aumenta con la reducción de  $p_b/p_0$ , alcanza un máximo a  $p_b=p^*$  y permanece constante para valores de  $p_b/p_0$  menores que esta relación crítica. También se muestra en esta figura 11 el efecto de la contrapresión en la presión de salida de la tobera  $p_s$ . Observe que

$$p_s = \begin{cases} p_b & \text{para } p_b \geq p^* \\ p^* & \text{para } p_b < p^* \end{cases}$$

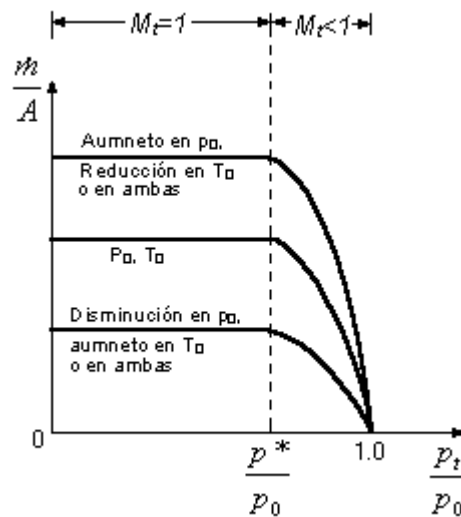
Para resumir, en todas las contrapresiones menores que la presión crítica  $p^*$  la presión en el plano de salida de la tobera convergente  $p_s$  es igual a  $p^*$ , el número de Mach en el plano de salida es la unidad, y la relación de flujo de masa es la relación de flujo máxima o estrangulada. Debido a que la velocidad del flujo es sónica en la garganta para una relación de flujo máxima, una contrapresión menor que la presión crítica no puede registrarse en el flujo aguas arriba de la tobera y no afecta la relación de flujo. [10]

Los efectos de la temperatura de estancamiento  $T_0$  y de la presión de estancamiento  $p_0$  en la relación de flujo de masa a través de una tobera convergente se ilustran en la figura 11, donde la relación del flujo de masa por área unitaria se grafica contra la relación de presiones estática y de estancamiento en la garganta  $p_t / p_0$ . Un aumento en  $p_0$  (o una reducción de  $T_0$ ) aumentará el flujo de masa por área unitaria a través de la tobera convergente, una disminución en  $p_0$  (o aumento en  $T_0$ ) lo reducirá. La misma conclusión resulta de observar cuidadosamente las ecuaciones 3.17 y 3.18. [10]

Una relación para la variación del área de flujo  $A$  a lo largo de la tobera relativa al área de la garganta  $A^*$  puede obtenerse combinando las ecuaciones 14 y 15 para las mismas relaciones de flujo de masa y propiedades de estancamiento de un fluido particular. Esto produce

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right) \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{(k+1)/[2(k-1)]}$$

**Ecuación 16**



**Figura 12. La variación de la relación de flujo de masa a través de una tobera con propiedades de estancamiento de entrada.**

#### **4.3.1.2.2 Toberas convergentes-divergentes**

Cuando se piensa en toberas, se consideran por lo común pasajes de flujo cuya área de sección transversal disminuye en la dirección del flujo. Sin embargo, la velocidad más alta a la cual un fluido puede acelerarse en una tobera convergente está limitada a la velocidad sónica ( $M=1$ ), la cual sucede en el plano de salida (garganta) de la tobera. La aceleración de un fluido hasta velocidades

supersónicas ( $M > 1$ ) puede lograrse sólo uniendo una sección de flujo divergente a la tobera subsónica en la garganta. La sección de flujo combinado que resulta es una tobera convergente-divergente, que es un equipo estándar en aviones supersónicos. [10]

Forzar un fluido a través de una tobera convergente-divergente no es garantía de que el fluido se acelerará hasta una velocidad supersónica. De hecho, el fluido puede desacelerarse en la sección divergente, en vez de acelerar, si la contrapresión no está en el intervalo correcto. Para condiciones de entrada dadas, el flujo a través de una tobera convergente-divergente está gobernado por la contrapresión  $p_b$ , como se explica en seguida. [10]

Si se considera la tobera convergente-divergente mostrada en la figura 13. Un fluido entra en la tobera con una baja velocidad a la presión de estancamiento  $p_0$ . Cuando  $p_b = p_0$  (caso A), no habrá flujo a través de la tobera. Esto se esperaba, puesto que el flujo en una tobera es forzado por la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la tobera. Ahora se verá qué sucederá cuando se reduzca la contrapresión. [10]

1. Cuando  $p_0 > p_b > p_c$ , el flujo permanece subsónico a lo largo de toda la tobera y el flujo de masa es menor que el correspondiente al flujo estrangulado. La velocidad del fluido aumenta en la primera sección (convergente) y alcanza un máximo en la garganta (pero  $M < 1$ ). Sin embargo, la mayor parte de la ganancia en la velocidad se pierde en la segunda sección (divergente) de la tobera que actúa como difusor. La presión se reduce en la sección convergente, alcanza un mínimo en la garganta y aumenta a expensas de la velocidad en la sección divergente.

2. Cuando  $p_b = p_c$ , la presión en la garganta se vuelve  $p^*$  y el fluido alcanza la velocidad sónica en la garganta. Pero la sección divergente de la tobera sigue

actuando como difusor, desacelerando el fluido hasta velocidades hasta velocidades subsónicas. La relación de flujo de masa que se incrementaba con la disminución de  $p_b$  alcanza también su valor máximo. [10]

Hay que tener en cuenta que  $p^*$  es la presión más baja que puede obtenerse en la garganta, y que la velocidad sónica es la velocidad más alta que puede alcanzarse con una tobera convergente. De manera que reducir aún más  $p_b$  no tendrá efecto en el flujo del fluido en la convergente de la tobera o en la relación de flujo de masa a través de ella. Sin embargo, afectará el carácter del flujo en la sección divergente. [10]

3. Cuando  $p_C > p_b > p_E$ , el fluido que alcanzó una velocidad sónica en la garganta continúa acelerando hasta velocidades supersónicas en la sección divergente cuando la presión disminuye. Sin embargo, esta aceleración termina en un paro repentino cuando un choque normal se desarrolla en una sección entre la garganta y el plano de salida, el cual ocasiona una caída repentina en la velocidad hasta niveles subsónicos y un súbito aumento en la presión. El fluido continúa después desacelerándose aún más en la parte restante de la tobera convergente-divergente. El flujo a través del choque es altamente irreversible y, consecuentemente, no puede considerarse isentrópico. El choque normal se mueve aguas abajo alejándose de la garganta a medida que  $p_b$  se reduce, y se aproxima al plano de salida de la tobera conforme  $p_b$  se acerca a  $p_E$ .

Cuando  $p_b = p_E$ , el choque normal se forma en el plano de salida de la tobera. El flujo es supersónico a través de toda la sección, divergente en este caso, y puede tratarse como isentrópico. Sin embargo, la velocidad del fluido cae a niveles subsónicos exactamente antes de abandonar la tobera cuando cruza el choque normal. Las ondas de choque normales se analizan en la siguiente sección. [10]

4. Cuando  $p_E > p_b > 0$ , el flujo en la sección divergente es supersónico, y el fluido se expande hasta  $p_F$  en la salida de la tobera sin que se forme choque normal dentro de ella. De esa manera el flujo a través de la tobera puede aproximarse como isentrópico. Cuando  $p_b = p_F$ , no suceden choques dentro o fuera de la tobera. En el caso de que  $p_b < p_F$ . Las ondas de mezcla y expansión irreversibles suceden aguas abajo del plano de salida de la tobera. Cuando  $p_b > p_F$ , sin embargo, la presión del fluido aumenta de  $p_F$  a  $p_b$  irreversiblemente en la estela de la salida de la tobera, creando lo que se conoce como *choques oblicuos*. [10]

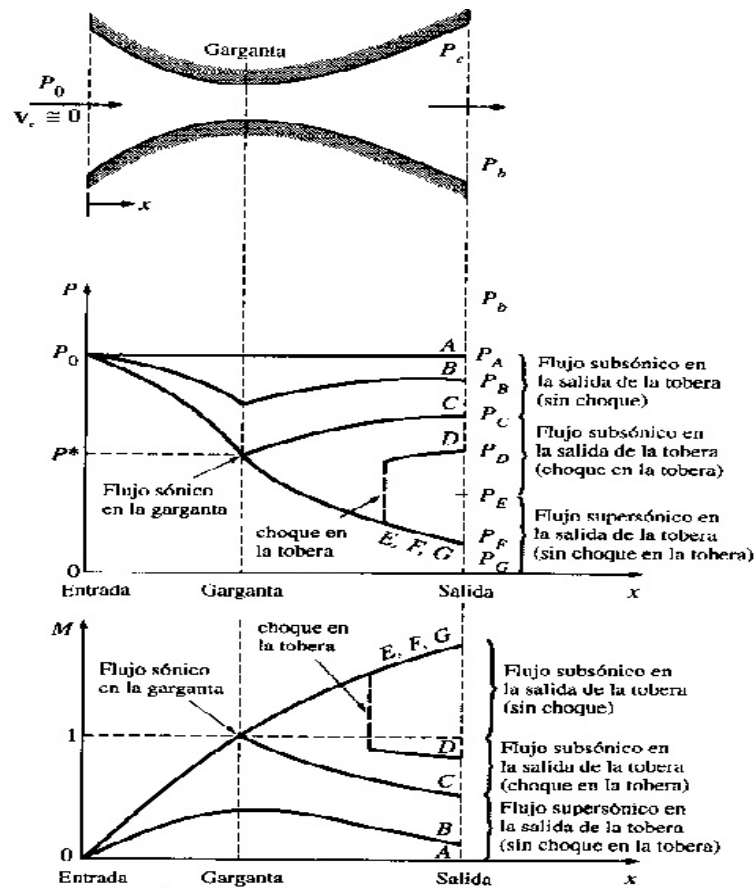


Figura 13. Los efectos de la contrapresión en el flujo a través de una tobera convergente-divergente.

#### 4.3.1.3 Factores a Tener en Cuenta en una Tobera

##### 4.3.1.3.1 Variación de la Velocidad del Fluido con el Area de Flujo

La investigación inicia buscando relaciones entre la presión, temperatura, densidad, velocidad, área de flujo y el número de Mach para flujo isentrópico unidimensional. Se considera la ecuación de la conservación de la masa para un proceso de flujo permanente: [10]

$$m = \rho AV = \text{constante}$$

Al diferenciar y dividir la ecuación resultante entre la relación de flujo de masa, se obtiene

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0$$

**Ecuación 17**

De la ecuación de conservación de la energía, despreciando la energía potencial

$$h_e + \frac{V_e^2}{2} = h_s + \frac{V_s^2}{2}$$
$$h + \frac{V^2}{2} = \text{constante}$$

**Ecuación 18**

Diferenciando,

$$dh + VdV = 0$$

Ahora, de la ecuación

$$Tds = dh - vdp$$

Se obtiene

$$dh = vdp$$

debido a que el proceso es isentrópico ( $ds=0$ ).

Sustituyendo,

$$\frac{dp}{\rho} + VdV = 0$$

**Ecuación 19 (3.7)**

Esta relación también es la forma diferencial de la ecuación de Bernoulli. Que es una forma del principio de la conservación del momento para volúmenes de control de flujo permanente. Al combinar las dos ecuaciones anteriores, se obtiene

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho} \left( \frac{1}{V^2} - \frac{d\rho}{dp} \right)$$

**Ecuación 20 (3.8)**

Si se arregla la ecuación 3.5 como  $(\partial\rho/\partial p)_s = 1/C^2$ , al sustituir en la ecuación 3.8 resulta

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2} (1 - M^2)$$

**Ecuación 21 (3.9)**

Ésta es una relación importante para el flujo isentrópico en ductos puesto que describe la variación de la presión con el área de flujo. Observe que  $A$ ,  $\rho$  y  $V$  son cantidades positivas. Para flujo subsónico ( $M < 1$ ), el término  $1 - M^2$  es positivo; es por ello que  $dA$  y  $dp$  deben tener el mismo signo. Esto significa que la presión del fluido debe aumentar cuando el área de flujo del ducto aumenta y debe disminuir cuando el área de flujo del ducto disminuye. Por ello a velocidades subsónicas, la presión disminuye en ductos convergentes (toberas subsónicas) y aumenta en ductos divergentes (difusores subsónicos). [10]



En flujo *supersónico* ( $M > 1$ ), el término  $1 - M^2$  es negativo, por lo que  $dA$  y  $dp$  deben tener signos opuestos. Es decir, la presión del fluido debe aumentar cuando el área de flujo del ducto disminuye y debe disminuir cuando dicha área aumenta. De modo que a velocidades supersónicas, la presión disminuye en ductos divergentes (toberas supersónicas) y aumenta en ductos convergentes (difusores supersónicos). [10]

Otra importante relación para el flujo isentrópico de un fluido se obtiene al sustituir  $\rho V = -dp / dV$  de la ecuación 3.7 en la ecuación 3.9:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V^2}(1 - M^2)$$

**Ecuación 22      (3.10)**

Esta ecuación gobierna la forma que una tobera o un difusor deben tener en un flujo isentrópico subsónico. Obsérvese que  $A$  y  $V$  son cantidades positivas, por tanto:

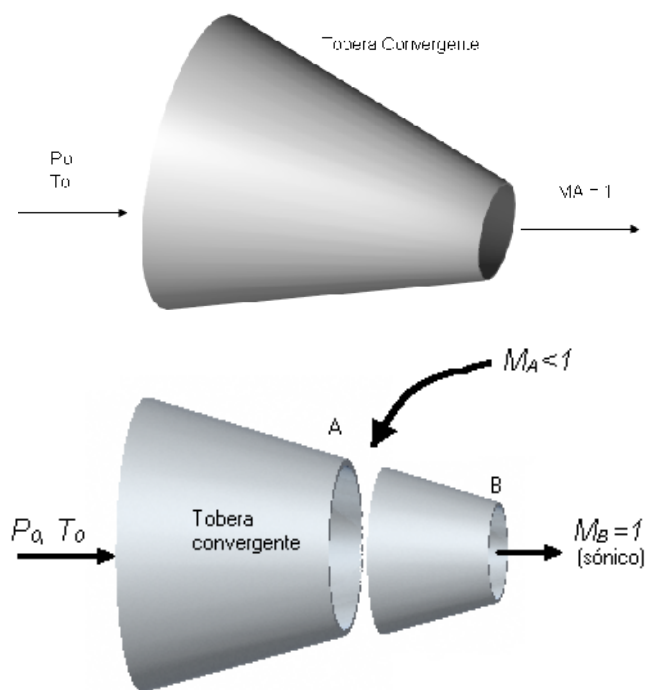
Para flujo subsónico ( $M < 1$ )     $\frac{dA}{dV} < 0$

Para flujo supersónico ( $M > 1$ )     $\frac{dA}{dV} > 0$

Para flujo sónico ( $M = 1$ )     $\frac{dA}{dV} = 0$

De modo que la forma adecuada de una tobera depende de la velocidad más alta deseada relacionada con la velocidad sónica. Para acelerar un fluido se debe

utilizar una tobera convergente a velocidades subsónicas y una tobera divergente a velocidades supersónicas. Las velocidades encontradas en las aplicaciones más familiares están bastante debajo de la velocidad sónica y, en consecuencia, es natural que se visualice una tobera como un conducto convergente. Sin embargo, la velocidad más alta que se puede alcanzar mediante una tobera convergente es la velocidad sónica, la cual sucederá a la salida de la tobera. Si se extiende la tobera convergente disminuyendo aún más el área de flujo, con la esperanza de acelerar el fluido hasta velocidades supersónicas, como se muestra en la figura 6, se desilusionará. En estas circunstancias la velocidad sónica se presentará a la salida de la extensión convergente en lugar de a la salida de la tobera original, y la relación de flujo de masa a través de la tobera disminuirá debido al área de salida reducida. [10]



**Figura 14. No es posible obtener velocidades supersónicas uniendo una sección convergente a una tobera convergente. Hacerlo de este modo sólo movería la sección transversal sónica más lejos aguas abajo.**

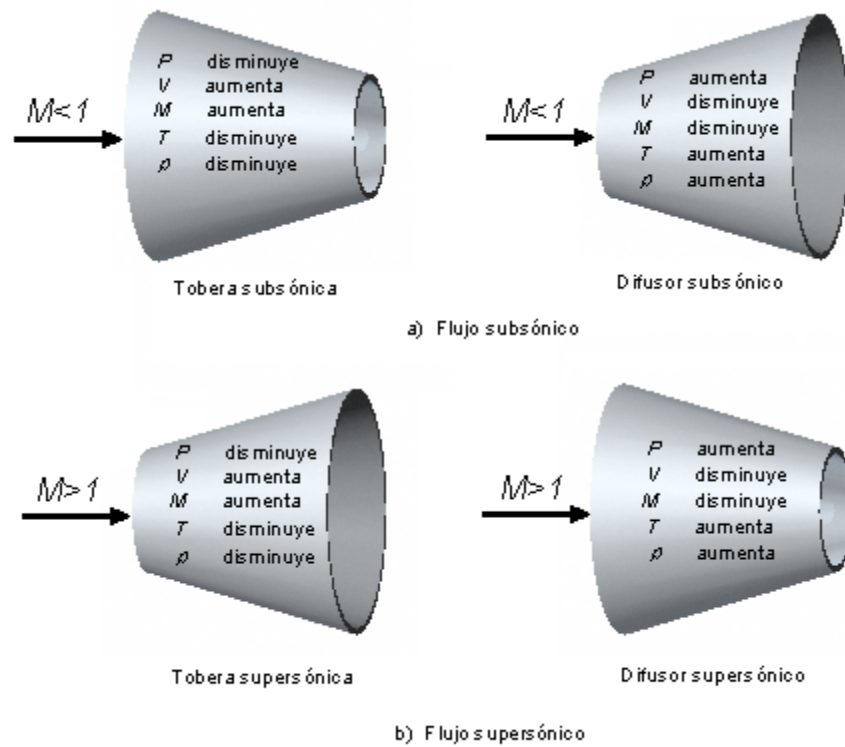
Con base en la ecuación 3.9, que es una expresión de los principios de la conservación de la masa y de la energía, se debe añadir una sección divergente a una tobera convergente para acelerar un fluido a velocidades supersónicas. El resultado es una tobera convergente-divergente.

El fluido pasa primero a través de una sección subsónica (convergente), donde el número de mach aumenta cuando disminuye el área de flujo de la tobera, y luego alcanza el valor de la unidad en la garganta de la tobera. [10]

El fluido continúa acelerándose conforme atraviesa una sección supersónica (divergente). Al observar que  $\dot{m} = \rho AV$  para flujo permanente, aparece la gran disminución en la densidad que hace posible la aceleración en la sección divergente. Un ejemplo de este tipo de flujo es el de los gases de combustión calientes a través de una tobera en una turbina de gas. [9]

El proceso opuesto sucede en la entrada del motor de un avión supersónico. El fluido se desacelera al hacerlo pasar primero por un difusor supersónico que tiene un área de flujo que disminuye en la dirección del mismo. [9]

El flujo alcanza un número de Mach igual a la unidad en la garganta del difusor. El fluido se desacelera aún más en un difusor subsónico que tiene un área de flujo que aumenta en la dirección de éste, como se muestra en la figura 7.



**Figura 15. Variación de las propiedades de flujo en toberas y difusores subsónicos y supersónicos.**

#### 4.3.1.3.2 Numero de Mach

Es el estudio del flujo de gas, un parámetro útil es la razón de la velocidad del gas en cualquier punto a la velocidad sónica en el mismo punto. Se designa por el símbolo  $M$ :

$$M = \frac{V}{C}$$

**Ecuación 23**

Es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad del flujo ( $V$ ) y la velocidad del sonido ( $c$ ) es decir la velocidad a la que a la que una onda de presión se traslada a través de un fluido compresible. Si  $M < 1$ , el flujo es subsónico; si  $M = 1$ , el flujo es sónico; si  $M > 1$ , el flujo es supersónico.

Siendo el medio en que se mueve dicho objeto. Dicha relación puede expresarse según la ecuación

$$M = \frac{V}{V_s}$$

**Ecuación 24**

Es un número a dimensional típicamente usado para describir la velocidad de los aviones. Mach 1 equivale a la velocidad del sonido, Mach 2 es dos veces la velocidad del sonido, etc. [10]

#### **4.3.1.3.3 Flujo Adiabatico**

Cuando la transferencia de calor es cero, el flujo es adiabático. En este flujo la temperatura de remanso es constante a lo largo de una línea de corriente, independientemente de que el fluido sea con o sin fricción. [6]

#### **4.3.1.3.4 Selección de Toberas de Flujo**

La tobera de flujo se utiliza donde la instalación de una placa de orificio está limitada por el tramo de tubería recta disponible, si la capacidad excede a la capacidad del orificio, si las condiciones de flujo de vapor o líquido están por encima de 70 kg/cm<sup>2</sup> y/o 4,26 °C. la relación debe estar entre 0,45 y 8,0.

La tobera de flujo es muy utilizada para la medición de gases húmedos como el vapor saturado condensado en suspensión. Si el vapor es seco o recalentado, no será necesario el uso de la tobera al menos que exista otras condiciones que la requiera. Las pequeñas gotas en suspensión transportadas en una corriente de gas, puede ejercer un considerable efecto corrosivo en la placa de orificio, sin embargo la superficie curvada en el frente de la tobera la protege contra esa acción. [6]

Cuando la relacion de diametros aumenta la calidad de comportamientos de los elementos primarios disminuye, no sucede esto con la tobera sino hasta que la relacion excede de 0,8. por esta propiedad y el por el hecho de que es mas eficiente de la placa de orificio, la tobera de flujo se puede usar para medir fluidos con altas velocidades, situacion que se presenta cuando aumenta la capacidad de la planta y no se hacen los cambios adecuados a la tuberia. si el diametro de tuberia del proceso cuando se maneja vapor a altas temperaturas, se limita al minimo por el aumento del costo de la tuberia para altas temperaturas al aumentar su diametro, se justifica sobradamente el uso de la tobera la tobera que comunmente se utiliza es la tobera de radio largo. [7]

Esta tobera se encuentra en dos versiones ; diseño de beta baja y diseño de beta alta. la tobera de beta alta se recomienda para relaciones de diametro  $b$  entre 0,45 y 0,80. la tobera de beta baja se recomienda para relaciones  $b$  entre 0,20 y 0,50 . para valores beta entre 0,25 y 0,50 se puede usar cualquier diseño.

Las toberas se fabrican generalmente de acero inoxidable o de acero al cromo molibdeno. el acabado de la superficie en contacto con el fluido del orden de 6 a 10 micropulgadas ha dado como resultado mayor prediccion de los coeficientes de descarga y una excelente repetibilidad la salida o lado de descarga de la tobera se bisela con un angulo de 10 grados. [7]

#### **4.3.1.3.5 Eficiencia Isoentropica de las Toberas**

Las toberas son dispositivos esencialmente adiabaticos y se utilizan para acelerar un fluido .Por consiguiente ,el proceso isoentropico sirve como un modelo adecuado para las toberas. la eficiencia isoentropica de una tobera se define como la relacion entre la energia cinetica real del fluido a la salida de la tobera y el vapor de energia cinetica a la salida de una tobera isoentropica para el mismo estado inicial y presion de salida. las toberas no incluyen interacciones de trabajo y el fluido

experimenta poco o ningun cambio en su energia potencial cuando fluye por el dispositivo. [2]

Debido a la fricción que ocurre entre el fluido y las paredes de la tobera y entre las propias capas del fluido, se producen algunas pérdidas que hacen que el proceso de expansión sea irreversible pero adiabático y por lo tanto, habrá una diferencia entre el proceso de expansión en condiciones ideales y el proceso en condiciones reales relacionada con la eficiencia. [5]

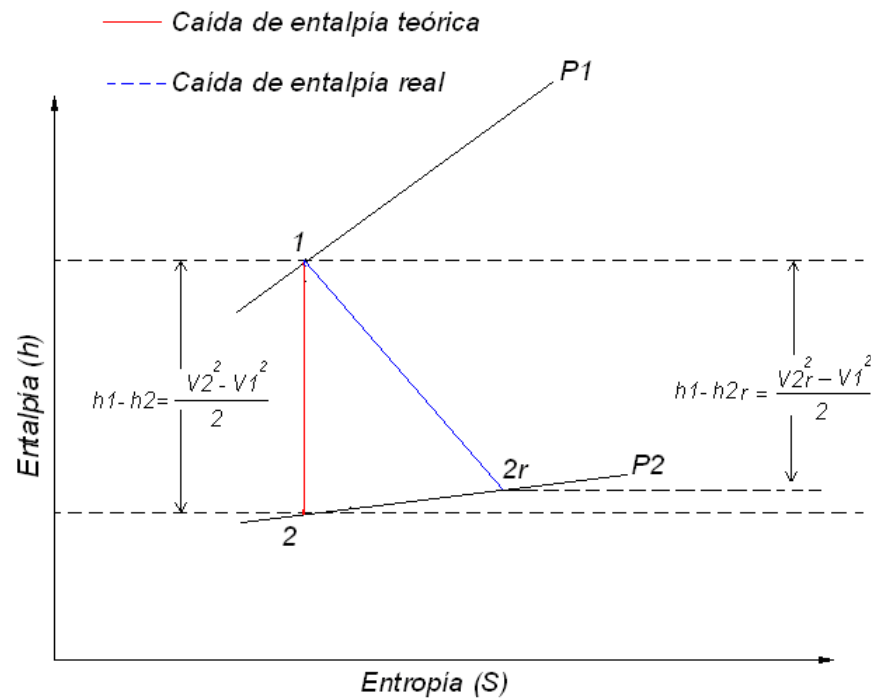


Figura 16. Diagrama h-s de los procesos real y isoentrópicos de una tobera adiabática.

En un proceso ideal o isoentrópico:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

$$h_1 - h_2 = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

Ecuación 25

Y en un proceso real:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_{2r} + \frac{V_{2r}^2}{2}$$
$$h_1 - h_{2r} = \frac{V_{2r}^2 - V_1^2}{2}$$

**Ecuación 26**

Entonces:

$$\eta_t = \frac{V_{2r}^2 - V_1^2}{V_2^2 - V_1^2}$$
$$\eta_t = \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_2}$$

**Ecuación 27**

Las eficiencias isotrópicas de las toberas están por lo general arriba del 90% y no es extraño encontrar toberas con eficiencias superiores al 95%.[6]



#### **4.3.1.3.6 Perdidas**

##### **4.3.1.3.6.1 Perdidas de Choque**

Contra la arista de entrada del álabe.

##### **4.3.1.3.6.2 Perdidas por Curvatura**

Que son las más importantes y radican en el efecto de la fuerza centrífuga sobre las partículas de vapor, fuerza que tiende a aumentar la presión sobre la cara cóncava, y a disminuirla sobre la convexa. Para su valoración se introduce un coeficiente y que compendia las pérdidas y modifica la velocidad relativa con que el vapor circula entre los álabes, de modo que la velocidad relativa de salida es:  $w_2 = w_1$ . [6]

#### **4.4 CFX**

ANSYS CFX es un software de dinámica de fluidos computacional CFD de propósito general, el cual combina un solucionador avanzado con poderosas de pre y post-proceso. [1]

##### **4.4.1 Tipos de Modelamiento en CFX**

- Fluidos en estado estable y transitorio
- Flujos laminares y turbulentos
- Flujos subsónicos, transónicos y supersónicos
- Boyamiento
- Flujos No-Newtonianos
- Transporte de componentes escalares no reactivos
- Flujos multifase

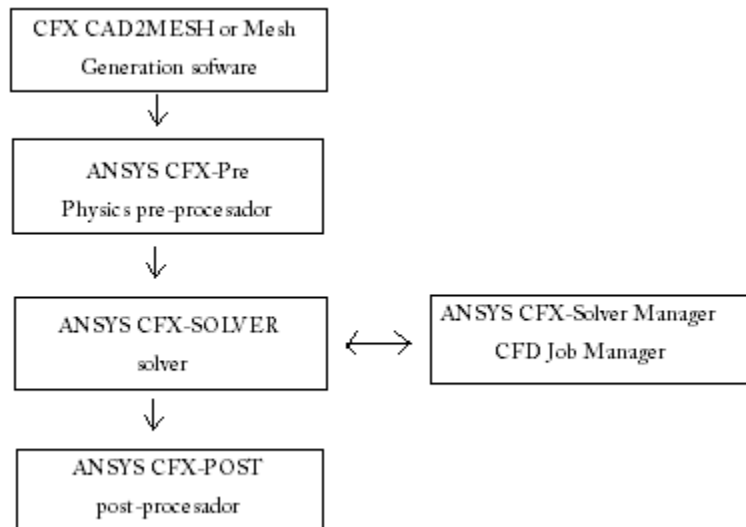
- Combustión
- Flujos en múltiples marcos de referencia
- Rastreo de partículas

#### 4.4.2 Características de CFX

1. Un avanzado solucionador acoplado que es a la vez robusto y confiable.
2. Integración completa de la definición del problema, análisis y presentación de resultados.
3. Un proceso intuitivo e interactivo, usando menús y graficas avanzadas. [1]

#### 4.4.3 Estructura ANSYS CFX

ANSYS CFX consiste de cinco modulos que pasan la información necesaria para realizar un análisis CFD.[1]



**Figura 17. Modulos Ansys CFX**

#### **4.4.4 Etapas del Proceso de Simulación de CFX**

##### **4.4.4.1 ANSYS CFX-Pre**

Ansyes CFX es el procesador de definiciones físicas de Ansyes CFX. Se usa para importar el enmallado y seleccionar los modelos físicos usados en la simulación CFD. [1]

##### **4.4.4.2 ANSYS CFX-Solver**

Soluciona todas las variables para la simulación a partir de las especificaciones del problema generadas en ANSYS CFX-Pre.

Este solucionador es mucho más rápido que los solucionadores segregados tradicionales y se requiere menor número de iteraciones para alcanzar la convergencia. [1]

##### **4.4.4.3 ANSYS CFX-Post**

Proporciona herramientas gráficas y numéricas de post – proceso para analizar y presentar los resultados de las simulaciones de ANSYS CFX. [1]

###### **4.4.4.3.1 Características del CFX-Post**

1. Post-proceso cuantitativo
2. Generación de reporte
3. Entrada por las líneas de comando, archivo de sección o archivo de estado
4. Variables definidas por el usuario
5. Generación de una variedad de objetos gráficos donde la visibilidad, transparencia, color de las líneas y caras pueden ser controlada
6. Power Syntax para crear secciones totalmente programables. [1]

#### 4.4.5 Interacción Entre los Módulos Pre-Solver y Post de ANSYS CFX

Durante el proceso de creación del modelo, solución en CFX-Solver y análisis de los resultados, se crean una variedad de tipos de archivos por los varios módulos de ANSYS CFX. Los módulos de ANSYS CFX interactúan entre sí por medio de estos archivos de la forma que se ilustra en la figura 18. [1]

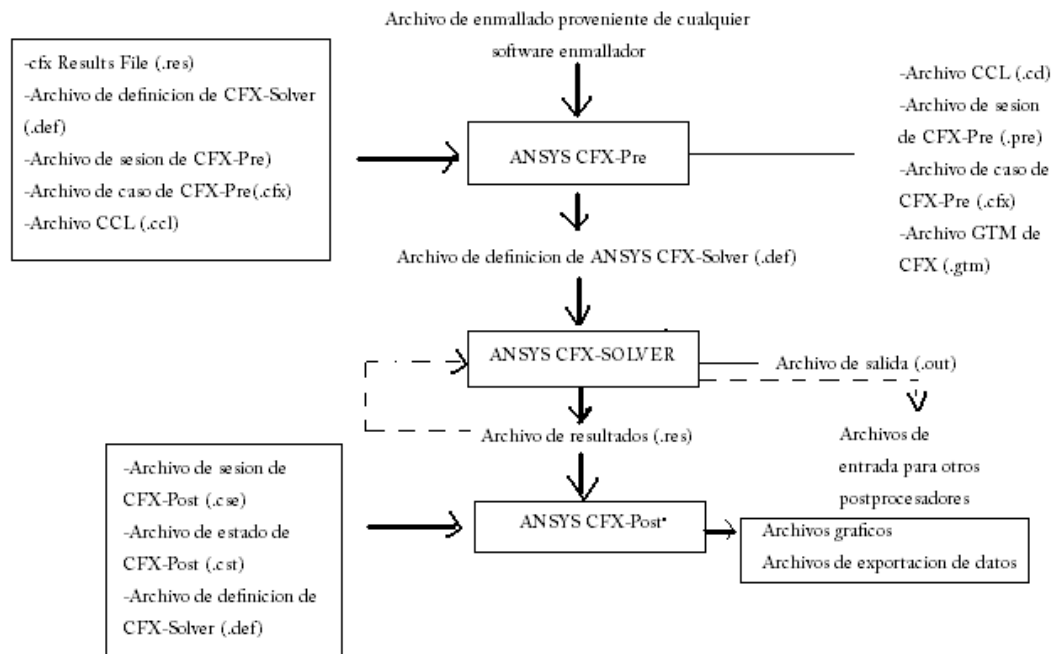


Figura 18. Interacción entre Módulos

#### 4.4.6 Regiones de Flujo en ANSYS CFX

##### 4.4.6.1 Dominios

En ANSYS CFX, las regiones de flujo de fluidos y o la transferencia de calor, son llamados dominios. Los dominios de fluido definen una región de flujo de fluido, mientras que los dominios de sólidos son regiones ocupadas por sólidos conductores, en los cuales se pueden especificar fuentes volumétricas de energía. [1]

#### **4.4.6.1.1 Especificaciones Requeridas para el Dominio**

1. La región definiendo el flujo o el sólido conductor. Un dominio es formado de uno o más volúmenes que contienen la región ocupada por el fluido o sólidos conductores.
2. La naturaleza física del flujo. Esto determina el moldeamiento de condiciones específicas tales como la transferencia de calor.
3. Las propiedades de los materiales en la región.

Puede haber varios dominios por modelo, en los cuales cada dominio es definido por volúmenes separados. Los problemas Multidominio pueden ser creados a partir de múltiples enmallados o de un solo enmallado, si este contiene múltiples volúmenes. [1]

#### **4.4.6.2 Subdominios**

Los subdominios son regiones de flujo o transferencia de calor en los cuales pueden ser especificadas fuentes de masa, momento, turbulencia, variables adicionales y fracciones másicas. También pueden ser usados para modelar resistencia de flujo. [1]

#### **4.4.6.3 Estado Estable y Estado Transitorio**

Las simulaciones de Estado Estable, por definición, son aquellas en las cuales las características no cambian con el tiempo y aquellas en que las condiciones estables, se asume, que son alcanzadas después de un largo intervalo de tiempo. Por eso no requiere de información de tiempo real para escribirlo. Muchos flujos prácticos pueden ser asumidos como estables después de un desarrollo de flujo inestable inicial. [1]

Las simulaciones transitorios requieren información en tiempo real para determinar los intervalos de tiempo a los cuales ANSYS CFX-Sol ver calcula el campo de flujo. Un comportamiento transitorio puede ser causado por el cambio inicial de las

condiciones de frontera del flujo, como en una arrancada, o puede estar inherentemente relacionado a las características del flujo, de tal manera que la condición estable nunca es alcanzada. [1]

#### **4.4.6.4 Turbulencia**

La turbulencia es difícil de definir de forma precisa. El movimiento de un fluido se describe como turbulento si es irregular, rotacional, intermitente, altamente desordenado, difusivo y disipativo. Este movimiento es inherentemente inestable y tridimensional. La visualización de este tipo de flujo revela estructuras de flujo rotacional, también conocidas como remolinos turbulentos. [1]

La turbulencia es intrínsecamente inestable, aun cuando se tengan condiciones de frontera constantes. La velocidad y otras propiedades del flujo fluctúan de una forma aleatoria y caótica. Existen tres aproximaciones diferentes, ampliamente clasificados en tres categorías que son el método estadístico, el método estructural y el método determinístico. De estos, el más utilizado para modelar la turbulencia es el método estadístico. [1]

#### **4.4.6.5 Convergencia**

La convergencia es tal vez la parte más importante de los códigos CFD. Generalmente los problemas CFD son no lineales, y las técnicas de solución usan un proceso iterativo para mejorar sucesivamente una respuesta, hasta alcanzar la convergencia. Convergencia puede significar muchas cosas diferentes, dependiendo del punto de vista con el que se le quiera ver. Una definición formal en matemáticas dice que la convergencia describe un comportamiento limitante, particularmente de una sucesión infinita o de una serie que tiende hacia cierto límite. [1]

Para poder afirmar que hay convergencia debe demandarse la existencia de un límite, lo cual puede ser incierto por si mismo. Se debe asegurar estar dentro de cualquier estándar de exactitud fijo para tener la certeza de haber alcanzado el criterio de convergencia. [1]

Tal como su definición la indica la solución exacta del problema iterativo es incierta, pero el objetivo es estar dentro de un rango exactitud requerida para que la solución este lo más cerca posible del límite de convergencia. Por tanto la convergencia debe estar asociada a un requisito de exactitud en particular. Este requisito depende del propósito que la solución busca. [1]

La convergencia también es a menudo medida por niveles residuales, que es la cantidad por la que no se satisface las ecuaciones sincretizadas, y por el error en la solución por lo tanto, el usuario debe tener cuidado cual criterio de convergencia de ser usado para determinar una solución, hay muchas opiniones sobre como juzgar la convergencia. [1]

## **5 DISEÑO METODOLOGICO**

En el marco del proyecto se realizó un modelamiento matemático y una simulación de la tobera ubicada en la turbina de vapor del laboratorio de plantas Térmicas.

El desarrollo del proyecto estuvo enmarcado en cuatro etapas: la primera etapa es de investigación teórica, la segunda etapa será la recopilación y selección de la información que realmente será útil para el desarrollo de este proyecto, la tercera etapa será el modelamiento matemático y la simulación en Ansys, finalmente una cuarta etapa de análisis de los resultados y entrega de un informe final el cual resume la aplicación del proyecto y las conclusiones.

### **5.1 ETAPA DE DOCUMENTACIÓN BIBLIOGRÁFICA**

#### **5.1.1 Etapa de Recopilación y Selección de la Información**

Revisión de conceptos básicos relacionados al tema del proyecto.

Revisión bibliográfica general del tema, con el fin de establecer un marco de referencia.

#### **5.1.2 Estudio de Diseños de Toberas**

Revisar los factores que se ven involucrados en el diseño de las toberas, determinar la estructura básica de una turbina de vapor y determinación de la eficiencia.

### **5.2 PLANEACIÓN**

En esta etapa, se realizó la adquisición de información, enfocada al objetivo del proyecto el cual es el modelamiento y análisis de una Tobera. En esta etapa se estudio los recursos que hay, para el desarrollo del mismo.



### **5.2.1 Identificación de Fuentes de Información**

En la investigación se pueden encontrar gran cantidad de fuentes de información, pero no todas estas fuentes nos ofrecen una información verídica y actualizada. Es por esta razón que se necesita hacer una selección de las mas adecuadas relacionadas a nuestro proyecto.

### **5.3 MODELAMIENTO MATEMATICO**

Se realizarón los cálculos los cuales nos permitieron determinar el comportamiento de la tobera.

### **5.4 SIMULACION**

En esta etapa se realizó la simulación en Ansys el cual nos permitio tener un punto de comparación con el modelamiento matemático.

### **5.5 ANÁLISIS**

En esta parte del proyecto se interpreta los datos obtenidos en el modelamiento matemático y en la simulación en Ansys teniendo en cuenta los parámetros de funcionamiento de la tobera y de la turbina a vapor. Con esta información podremos obtenemos las curvas de desempeño de la tobera en condiciones isoentrópicas. También en esta etapa se calcula la eficiencia de la tobera y la turbina a vapor.

### **5.6 INFORME FINAL**

La última etapa del proyecto está dirigida al desarrollo de un informe final el cual plasma el estudio realizado, análisis de los resultados, conclusiones, y propuestas para nuevos proyectos.

## 6 ESQUEMA TEMATICO

### 6.1 ANALISIS MATEMATICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TOBERA

#### 6.1.1 Toma de Datos

Como primera medida se obtuvieron los datos del comportamiento de la turbina en el laboratorio en estado estable de esto se obtuvieron los siguientes valores.

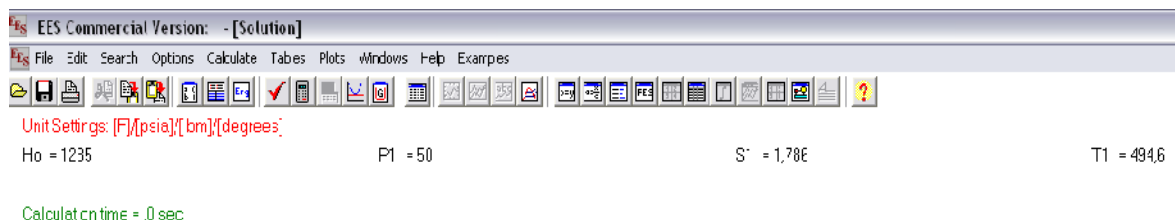
| CONDICIONES DE CORRIDA DE PLANTA EN LA TURBINA |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                                | ENTRADA<br>DE VAPOR | SALIDA DE<br>TOBERA | ENTRADA<br>DE VAPOR | SALIDA DE<br>TOBERA | ENTRADA<br>DE VAPOR | SALIDA DE<br>TOBERA | ENTRADA<br>DE VAPOR | SALIDA DE<br>TOBERA | ENTRADA<br>DE VAPOR | SALIDA DE<br>TOBERA |
| rpm                                            | 3250                |                     | 3300                |                     | 3600                |                     | 3700                |                     | 3900                |                     |
| KW                                             | 3                   |                     | 4                   |                     | 4,5                 |                     | 5                   |                     | 5,7                 |                     |
| PRESION(psi)                                   | 5                   | 4                   | 25                  | 22                  | 50                  | 25                  | 80                  | 25                  | 100                 | 28                  |
| TEMPERATURA(°C)                                | 275                 | 150                 | 290                 | 162                 | 258                 | 162                 | 260                 | 165                 | 250                 | 166                 |

**Tabla 1. Datos de la Turbina**

Para el analisis matematico solo se tuvo en cuenta los datos tomados para una velocidad de giro de la turbina equivalente a 3600 rpm, debido a que esta es la velocidad de operación. Estos datos son las variables de entrada para la utilizacion del programa Equation Solver (EES) con el fin de obtener el comportamiento matematico de la tobera.

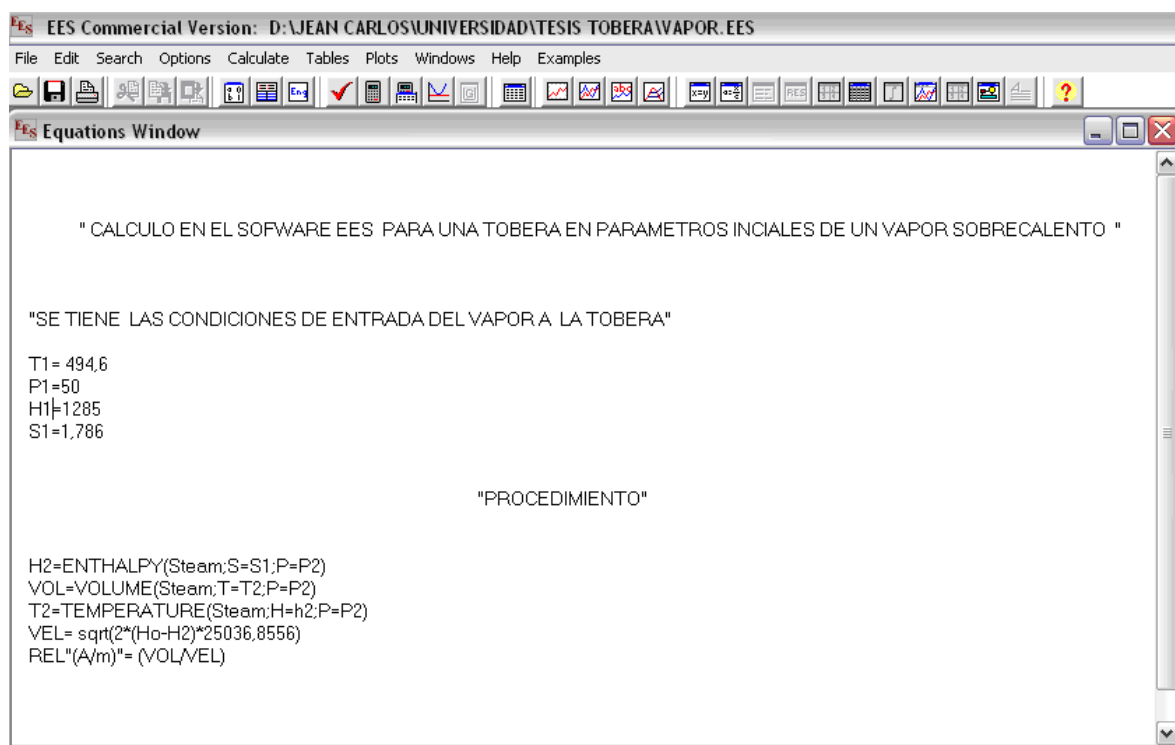
#### 6.1.2 Procedimiento Para el Modelo Matematico En (EES).

Con las condiciones de entrada del vapor en la tobera (T1, P1) calculamos los valores de entropia en la entrada (S1) y la entalpia en la entrada (H1) para estas condiciones por medio del (EES), ver figura 19.



**Figura 19. Calculo de H1 y S1**

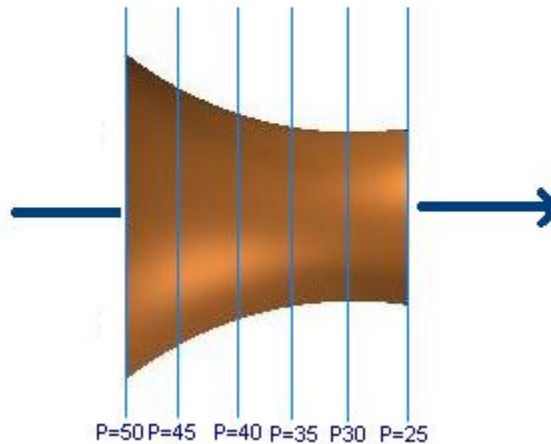
Obtenido los valores de entrada mencionados anteriormente procedemos a calcular los valores de entalpia en la Salida ( $H_2$ ), Volumen ( $V$ ), Temperatura de Salida ( $T_2$ ), Velocidad a la salida ( $VEL$ ) y la relacion Area / Flujo masico. Ver figura 20



**Figura 20. Datos Obtenidos del EES**

Los datos de entrada se toman como punto de referencia para poder calcular los datos mencionados anteriormente (H2, Vol, T2, Velocidad, Relacion A/Flujo Masico) para un rango de presion de 45 – 25 psi ver figura 22.

DISTRIBUCION DE PRESIONES ATRAVEZ DE LA TOBERA



| EES Parametric Table |      |    |       |       |         |       |
|----------------------|------|----|-------|-------|---------|-------|
| Table 5              |      |    |       |       |         |       |
|                      | H2   | P2 | T2    | VOL   | REL     | VEL   |
| Run 1                | 1271 | 45 | 471,9 | 12,19 | 0,01434 | 850,1 |
| Run 2                | 1259 | 40 | 446,5 | 13,34 | 0,01164 | 1146  |
| Run 3                | 1246 | 35 | 418,4 | 14,78 | 0,01055 | 1401  |
| Run 4                | 1231 | 30 | 386,9 | 16,62 | 0,01014 | 1640  |
| Run 5                | 1215 | 25 | 351   | 19,1  | 0,01019 | 1874  |

Figura 21. Tabla de los datos obtenidos en funcion de los parametros iniciales.

Con estos datos obtenidos el programa (EES) grafica el comportamiento de la tobera para diferentes relaciones de dichas variables.

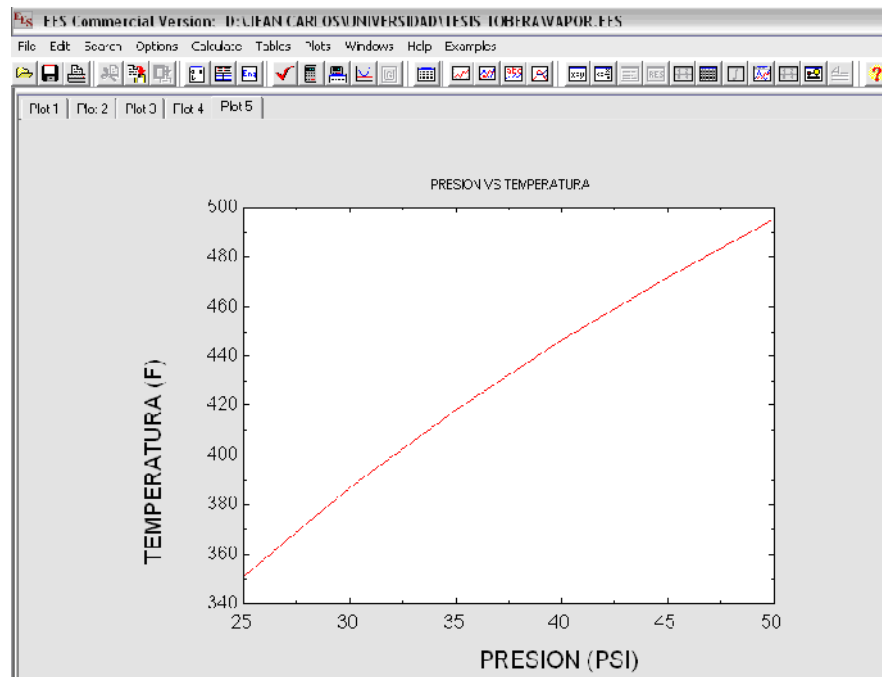


Figura 22. Grafica (Presion vs Temperatura)

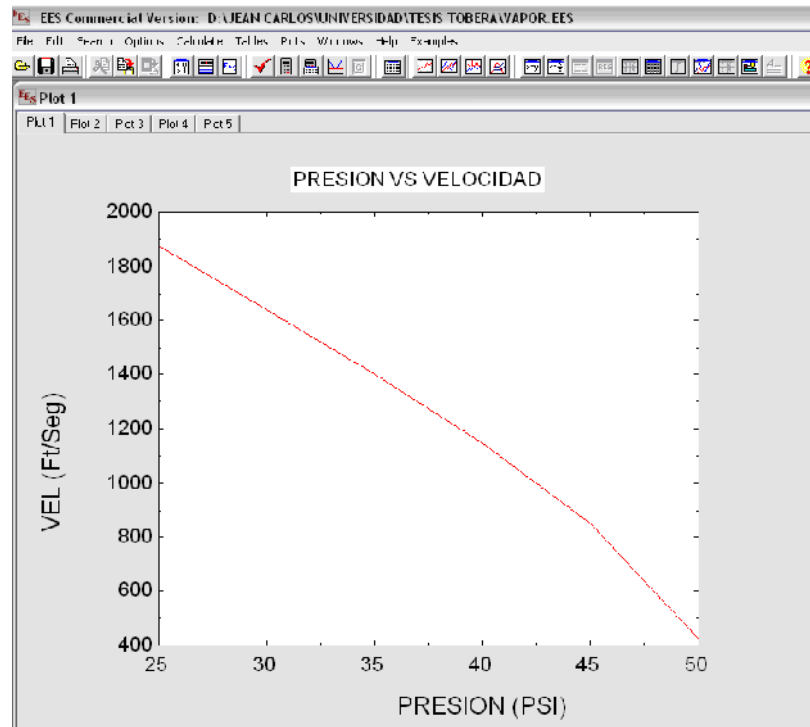


Figura 23. Grafica (Presion vs Velocidad)

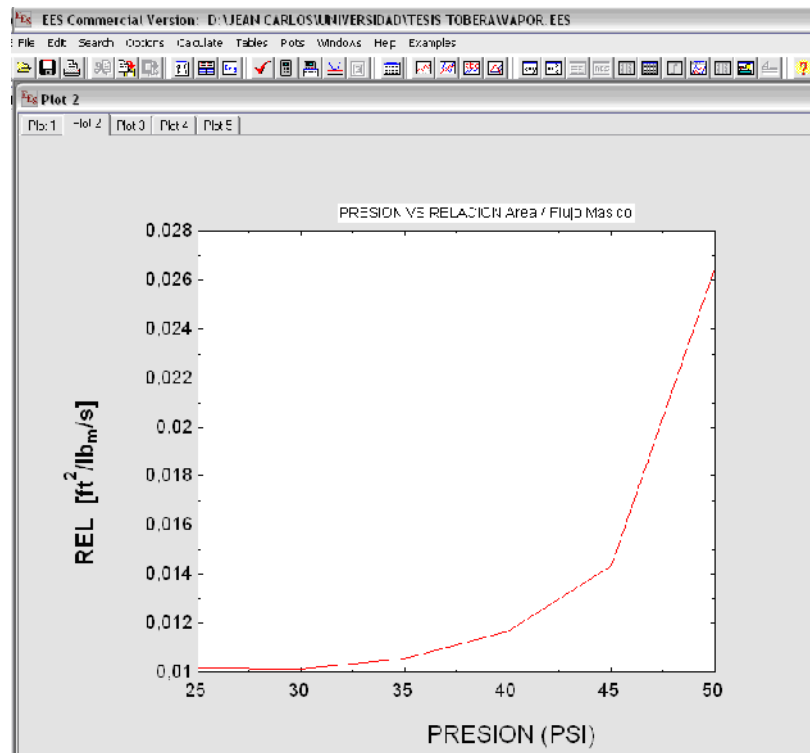


Figura 24. Grafica Presion vs Relación Area/ Flujo Masico

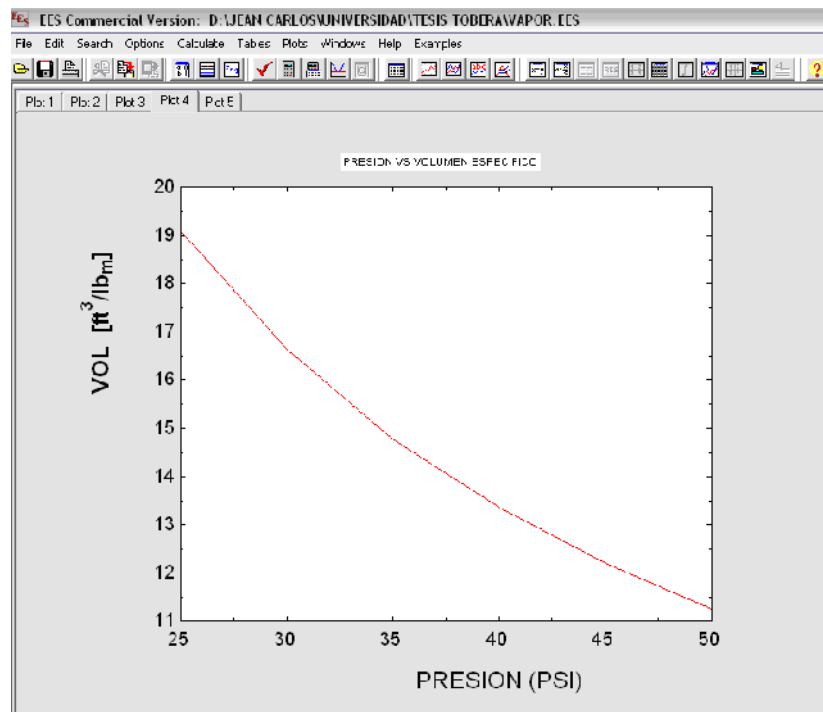


Figura 25. Grafica (Presion vs Volumen Especifico)

### 6.1.3 Analisis De Resultados De EES

En el análisis de distribución de temperatura Vs presión (Figura 22) se puede observar que la temperatura, es directamente proporcional a la presión, debido a la aceleración de flujo que se presenta en la tobera, ya que parte de su energía interna se convierte en energía cinética. Esto nos da una temperatura promedio del flujo de vapor en nuestro sistema de 428,21 °F. Como se puede observar a la entrada de la tobera para una presión de 50psi le corresponde una temperatura de 494,6°F y en la salida se tiene una presión de 25psi y una temperatura de 351°F, esto demuestra que hay una pérdida de temperatura en el sistema de 143,6°F debido a las razones que se explicaron anteriormente.

Analizando la gráfica de presión Vs velocidad (Figura 23), se observa que el comportamiento de la velocidad contra la presión es inversamente proporcional, queriendo decir con esto que a menor presión mayor velocidad de vapor. Esto es debido a que en la instalación, contamos con una tobera convergente cuya función es aumentar la velocidad del vapor disminuyendo su área de flujo, ver figura 14. Y su depósito es lo suficientemente grande de manera que la velocidad a la entrada de la tobera es despreciable, puesto que la velocidad del fluido en el depósito es cero. Como resultado del modelamiento matemático se calculó, que para una presión de 25psi que se presenta en la salida de la tobera, la velocidad de vapor es de 1874 ft/seg, este dato es de gran importancia para nuestro análisis porque a esta velocidad es con la que el vapor impacta de forma tangencial los alabes y permite el movimiento del rodete.

En la Figura 24 donde se muestra la presión Vs la relación área/flujo másico con esto se conoce que la presión es directamente proporcional a la relación, pero es de indicar que la presión no está involucrada en el cambio de la relación área/flujo, es el diseño de la tobera la que interviene en este cambio.

Podemos decir que la relación de flujo puede controlarse cambiando la presión de estancamiento, por lo que una tobera convergente puede utilizarse como medidor de flujo. La relación de flujo también puede controlarse, desde luego, variando el área de garganta. Cuando este alcanza un máximo flujo en la garganta, éste para nosotros es el valor máximo y posteriormente permanece constante para los valores menores de la relación crítica (garganta).

El resultado obtenido en la Figura 25, nos muestra el comportamiento de presión contra el volumen, por lo anterior se puede decir que a medida que la presión disminuye el volumen aumenta, esto se presenta por el diseño de la tobera convergente, ya que cuando la contrapresión llega al punto de la garganta, que es la presión necesaria para aumentar la velocidad de fluido hasta la velocidad del sonido, el flujo de masa alcanza un valor máximo y se dice que el flujo estará estrangulado y por lo tanto al acelerar el fluido por la disminución de su área hay una mayor cantidad de flujo de vapor que pasa en un instante de tiempo.



## 6.2 SIMULACIÓN EN ANSYS CFX

### 6.2.1 Pasos Para La realización de la Simulación

#### 6.2.1.1 Geometría

La geometría se realizó en Solid Edge tomando mediciones directas de la tobera. Posteriormente, en Ansys Design Modeler 11.0 se rellenó el espacio vacío de la tobera donde se solucionaron las ecuaciones de transporte.

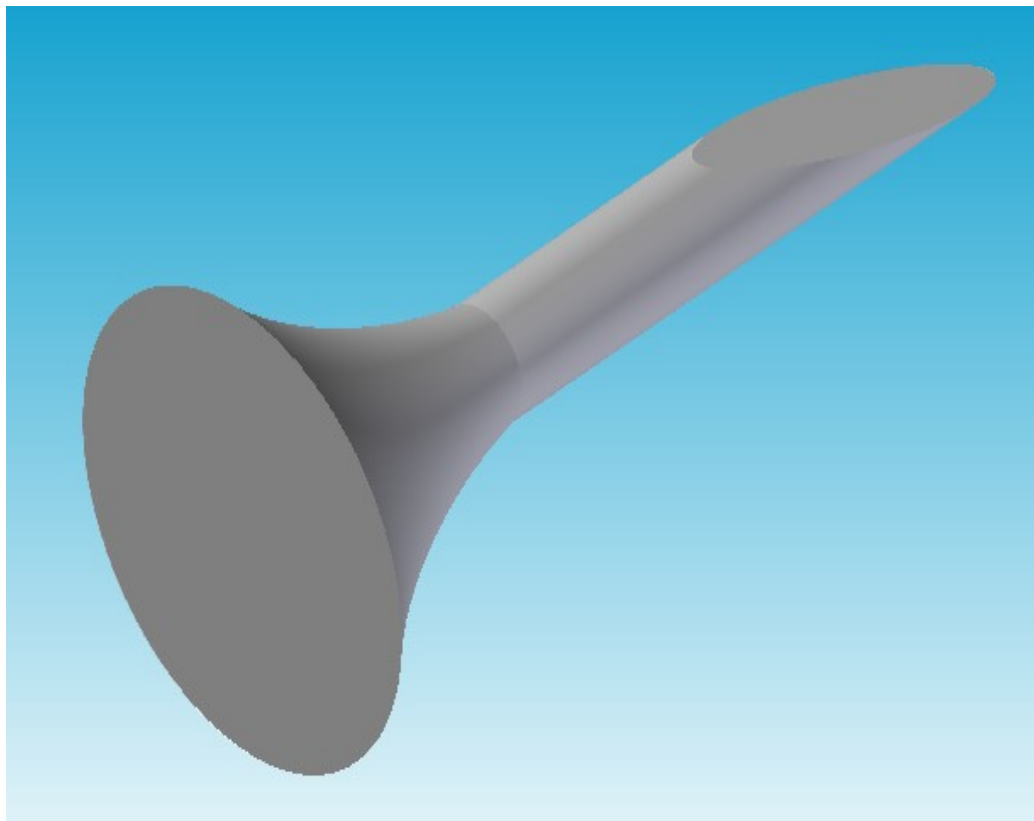


Figura 26. Tobera (Solid Edge)

### 6.2.1.2 Enmallado

Luego de tener definida la geometría objetivo de la simulación, se procedió a enmallar el dominio usando la técnica de enmallado de prioridad hexaédrico en Ansys Workbench Meshing 11.0. El resultado produjo una geometría de 9385 nodos y 12138 elementos (ver figura 28).

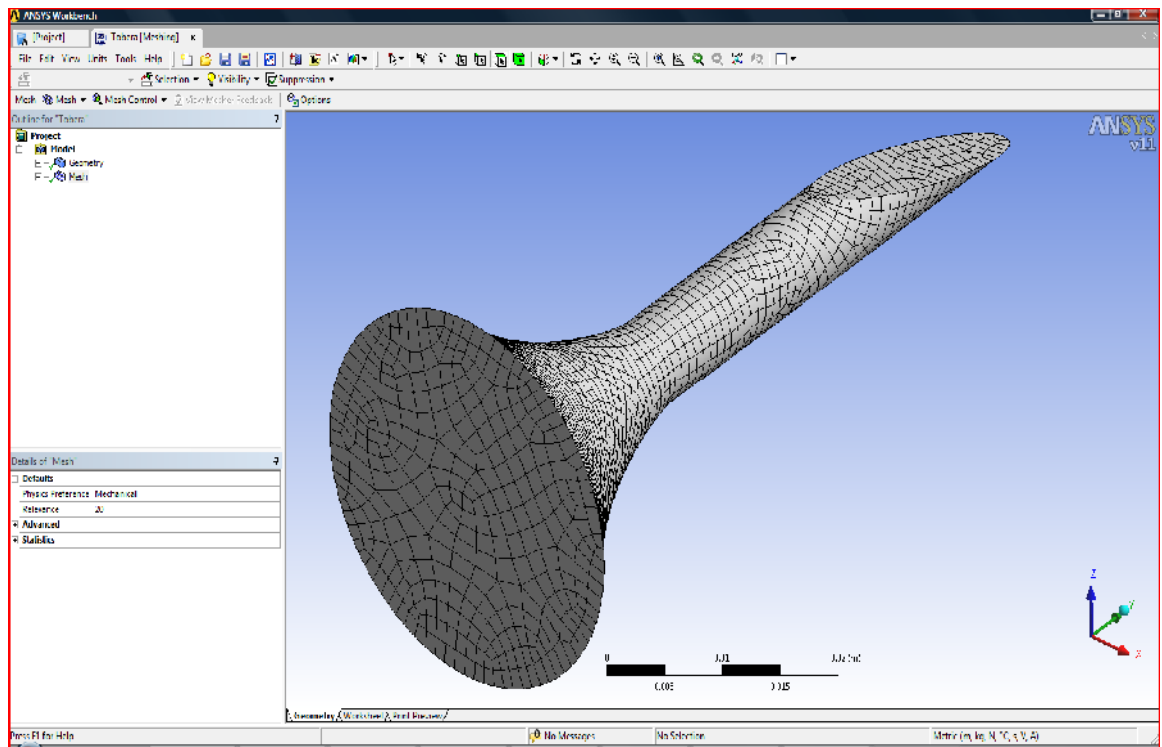


Figura 27. Enmallado de la tobera

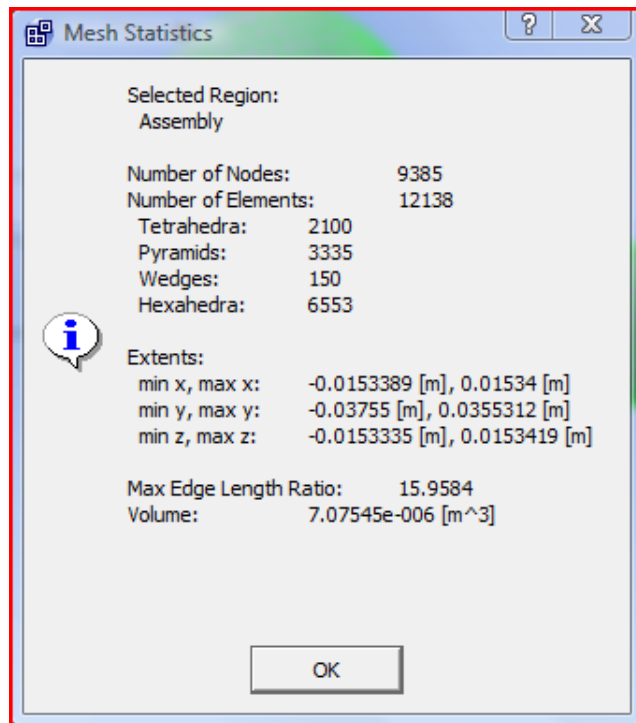


Figura 28. Estadística del proceso de enmallado

### 6.2.1.3 Preproceso

El preprocesamiento de la simulación se desarrolló en el paquete Ansys CFX-Pre 11.0. Aquí se importó el enmallado de la geometría definida en (1) y se definieron las condiciones de frontera de la simulación. Estas condiciones están dadas por la operación de la caldera y fueron datos tomados de pruebas de laboratorio. Estos fueron:

#### **6.2.1.3.1 Definición del dominio**

Se usó el modelo de turbulencia Shear Stress Transport – SST debido a la irregularidad geométrica del dominio. Para definir una simulación de flujo compresible en CFX-Pre se necesitan dos requisitos fundamentales: el primero es que las propiedades del material, en este caso vapor de agua, incluya la densidad como una función de la presión y/o de la temperatura; el segundo es que el modelo de transferencia de calor tenga la opción de energía total.

Este último requerimiento incluye los términos de energía cinética (debidos a un cambio brusco de velocidad y/o presión) y da la posibilidad de incluir un término de energía por disipación viscosa, que para este caso no se usó. Ansys CFX-Pre incluye una librería para las propiedades del vapor de agua con las propiedades calculadas a condiciones ideales, y esta librería puede usarse tanto para flujo incompresible como para flujo compresible. Las siguientes figuras muestran cómo se definieron estas condiciones en el preprocesador.

Outline | Domain: Default Domain | ✕

Details of **Default Domain**

General Options | Fluid Models | Initialisation

Basic Settings

|             |                 |     |
|-------------|-----------------|-----|
| Location    | B7              | ... |
| Domain Type | Fluid Domain    |     |
| Fluids List | Water Ideal Gas | ... |
| Coord Frame | Coord 0         |     |

☐ Particle Tracking +

Domain Models

Pressure [-]

|                    |         |
|--------------------|---------|
| Reference Pressure | 0 [atm] |
|--------------------|---------|

Buoyancy [-]

|        |             |
|--------|-------------|
| Option | Non Buoyant |
|--------|-------------|

Domain Motion [-]

|        |            |
|--------|------------|
| Option | Stationary |
|--------|------------|

Mesh Deformation [-]

|        |      |
|--------|------|
| Option | None |
|--------|------|

Figura 29. Dominios de Frontera

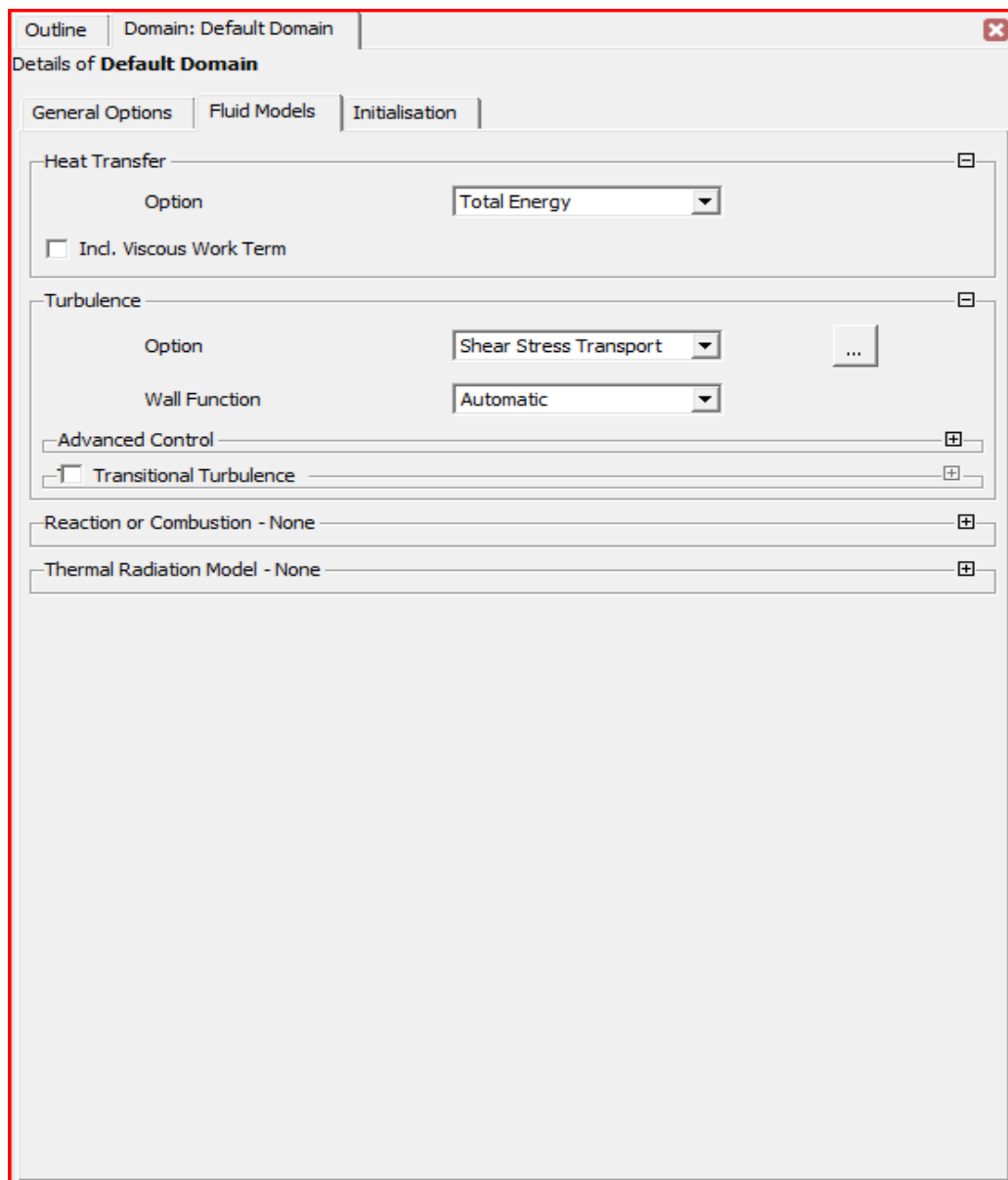


Figura 30. Dominio de Frontera

### 6.2.1.3.2 Entrada de la tobera

Se definió la entrada como “inlet” y su ubicación geométrica es la entrada de la tobera física, bajo las siguientes condiciones:

The image shows the 'Boundary: Inlet' settings panel in ANSYS Fluent. The panel is titled 'Details of Inlet in Default Domain' and has tabs for 'Basic Settings', 'Boundary Details', 'Sources', and 'Plot Options'. The 'Basic Settings' tab is active. The settings are organized into several sections, each with a collapse icon on the right:

- Flow Regime:** Option is set to 'Subsonic'.
- Mass And Momentum:** Option is set to 'Total Pressure (stable)'. The 'Relative Pressure' is set to '50 [psi]'.
- Flow Direction:** Option is set to 'normal to Boundary Condition'.
- Turbulence:** Option is set to 'Medium (Intensity = 5%)'.
- Heat Transfer:** Option is set to 'Static Temperature'. The 'Static Temperature' is set to '250 [C]'.

Figura 31. Dominio de Entrada

### 6.2.1.3.3 Salida de la tobera

Se definió como “outlet”, y su ubicación geométrica es la salida de la tobera física, bajo las siguientes condiciones:

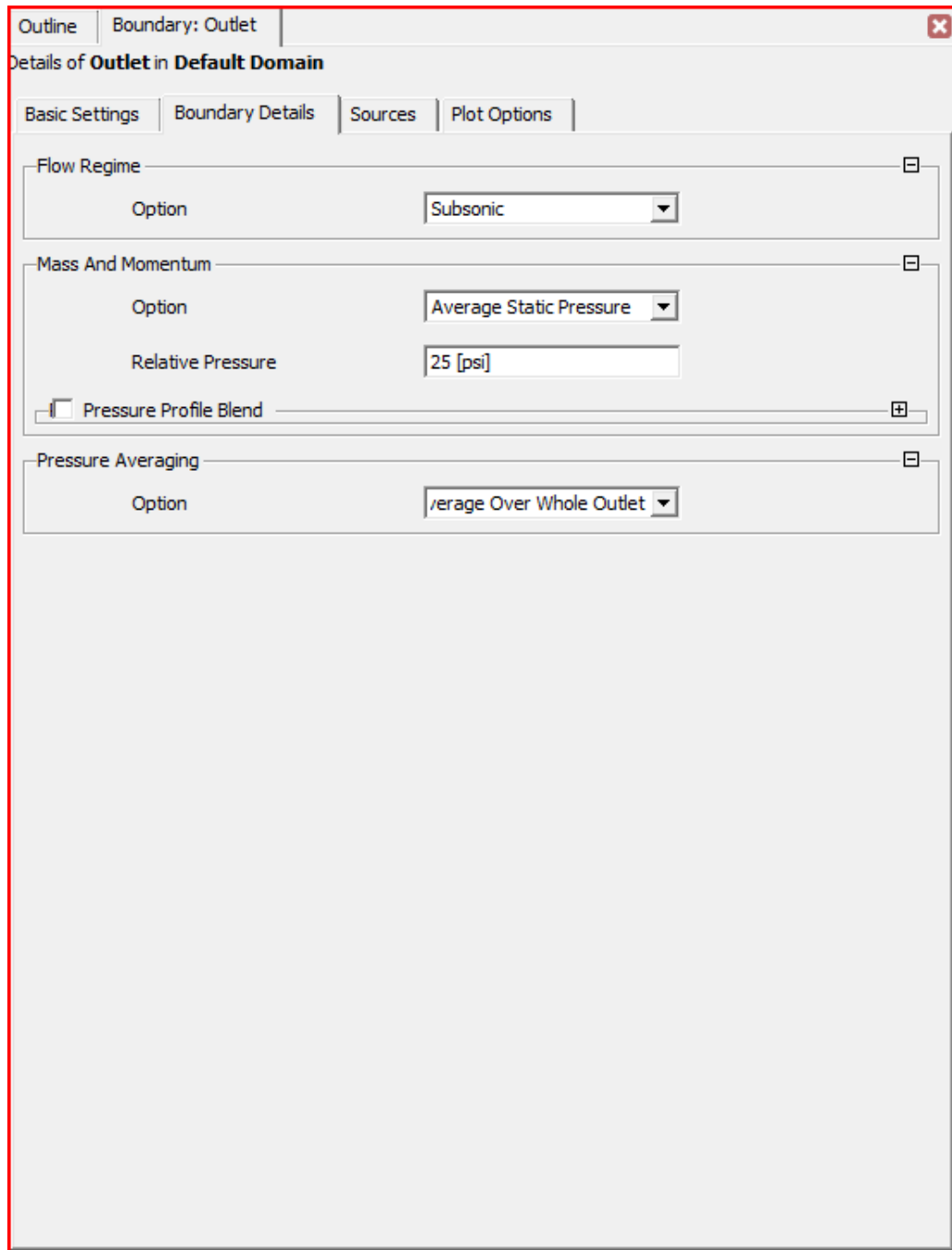


Figura 32. Dominio de Salida



#### 6.2.1.3.4 Opciones de solución

La escala de tiempo física (physical timescale) hace referencia a la variable discreta temporal que se usa en las ecuaciones de transporte para simular un flujo transitorio y así poder resolver correctamente las ecuaciones de Navier-Stokes. Esta variable es calculada de modo aproximado con la ecuación  $\Delta t = L/(2U)$ , donde **L** es la longitud aproximada del dominio y **U** es la velocidad de entrada. Otra opción importante es definir la convergencia de la solución. Ansys CFX en su sección de ayuda recomienda lo siguiente:

|                                            |                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $> 5 \times 10^{-4}$                       | Convergencia muy pobre. Los balances serán pobres y los datos serán altamente no-interpretables. Está bien para tener una idea global de lo que ocurre.                                                      |
| $5 \times 10^{-4}$                         | Convergencia aún floja, pero está bien para la mayoría de aplicaciones de ingeniería.                                                                                                                        |
| $1 \times 10^{-4}$                         | Buena convergencia. Frecuentemente suficiente para la mayoría de aplicaciones de ingeniería.                                                                                                                 |
| $5 \times 10^{-5}$                         | Es una convergencia ajustada. Si la geometría o las condiciones de frontera no están bien definidas, esta convergencia es más que necesaria. Generalmente no es posible alcanzar este nivel de convergencia. |
| $1 \times 10^{-5}$                         | Convergencia muy ajustada, requerida algunas veces para simulaciones muy sensibles a la geometría.                                                                                                           |
| De $1 \times 10^{-6}$ a $1 \times 10^{-7}$ | Es para computadoras especiales. Esta convergencia no es posible sin usar doble precisión en la mayoría de los casos. Convergencias de este tipo son sólo para propósitos académicos.                        |

**Tabla 2. Tomado de Ansys CFX 11.0 User's guide: Judging Convergence**

Por tanto, se definió la solución así:

Outline | Solver Control | Equation Class Settings | Advanced Options

Details of **Solver Control**

Basic Settings | Equation Class Settings | Advanced Options

Advection Scheme

Option: High Resolution

Convergence Control

☐ Minimum Number of Iterations

Max. Iterations: 100

Fluid Timescale Control

Timescale Control: Physical Timescale

Physical Timescale: 0.0001 [s]

Convergence Criteria

Residual Type: RMS

Residual Target: 1e-05

☐ Conservation Target

☐ Elapsed Time Control

Figura 33. Solución del Sistema

### 6.2.1.4 Solución

La solución de la simulación se llevó a cabo usando el paquete Ansys CFX-Solver 11.0. Los resultados fueron los siguientes:

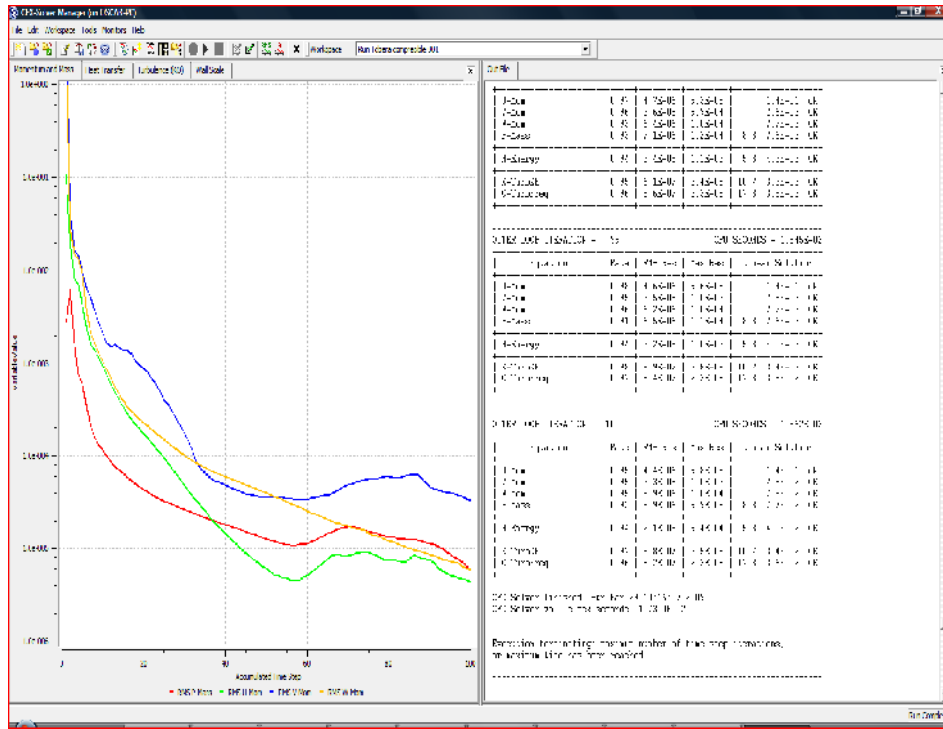


Figura 34. Convergencia

Donde la máxima convergencia fue de  $3.3 \times 10^{-5}$ , y ocurrió en *V-Moment* (momento en la dirección y).

| Mesh Information    |       |
|---------------------|-------|
| Number of Nodes:    | 9385  |
| Number of Elements: | 12138 |
| Tetrahedra:         | 2100  |
| Wedges:             | 150   |
| Pyramids:           | 3335  |
| Hexahedra:          | 6553  |

### 6.2.1.5 Post – Proceso

#### 6.2.1.5.1 Datos de la Primera Simulacion Ansys CFX

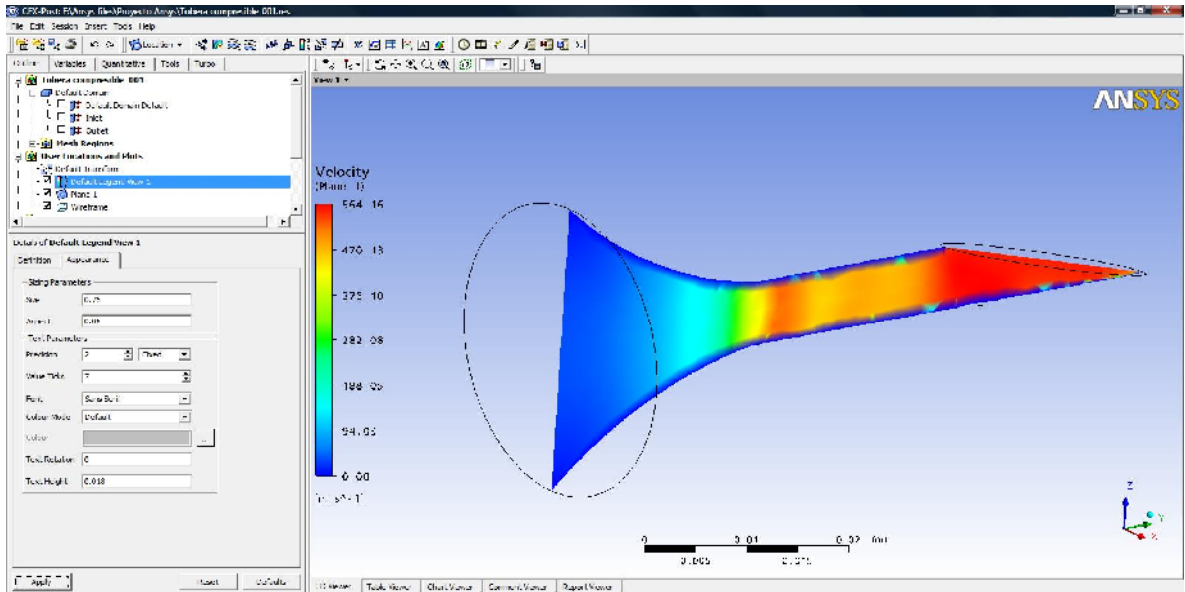


Figura 35. Perfil De Velocidad En CFX

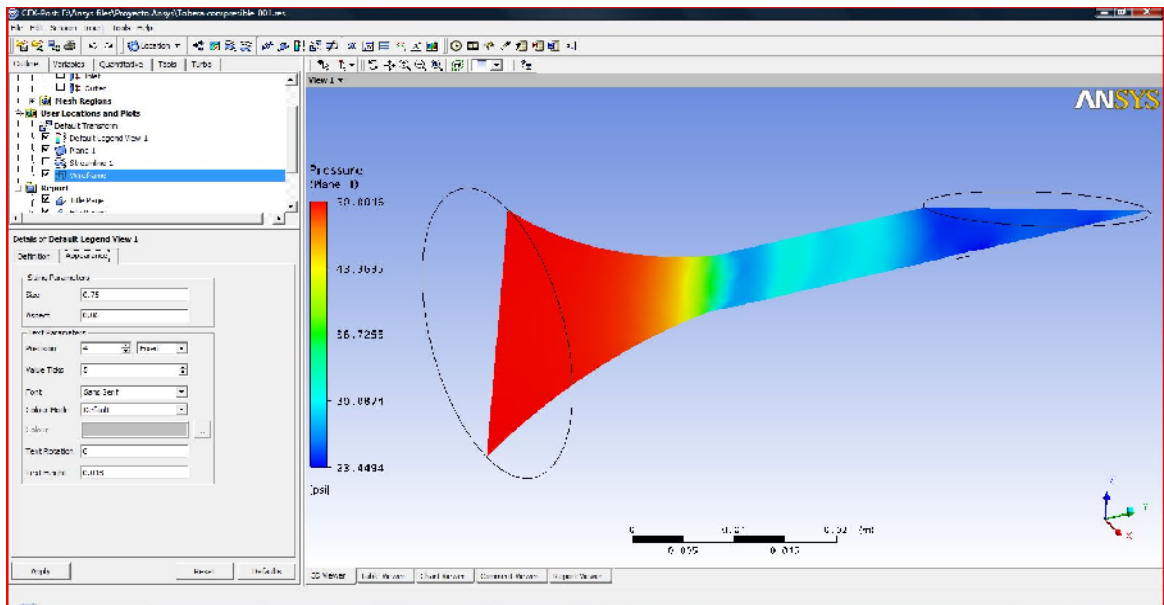


Figura 36. Perfil de Presion en CFX

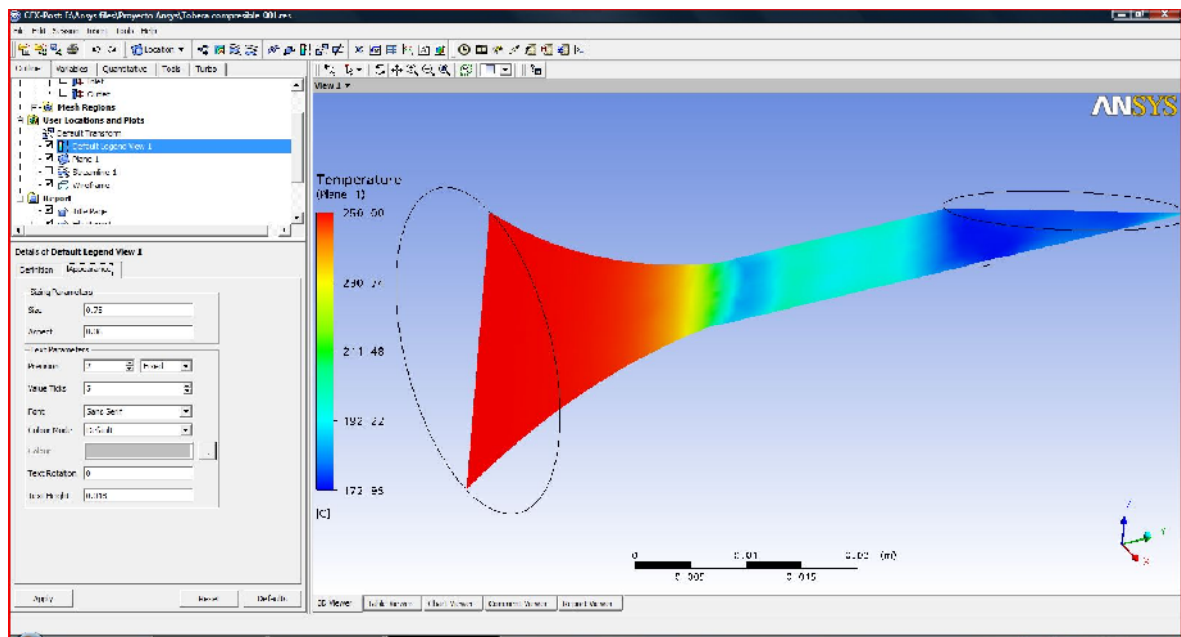


Figura 37. Perfil de Temperatura en CFX

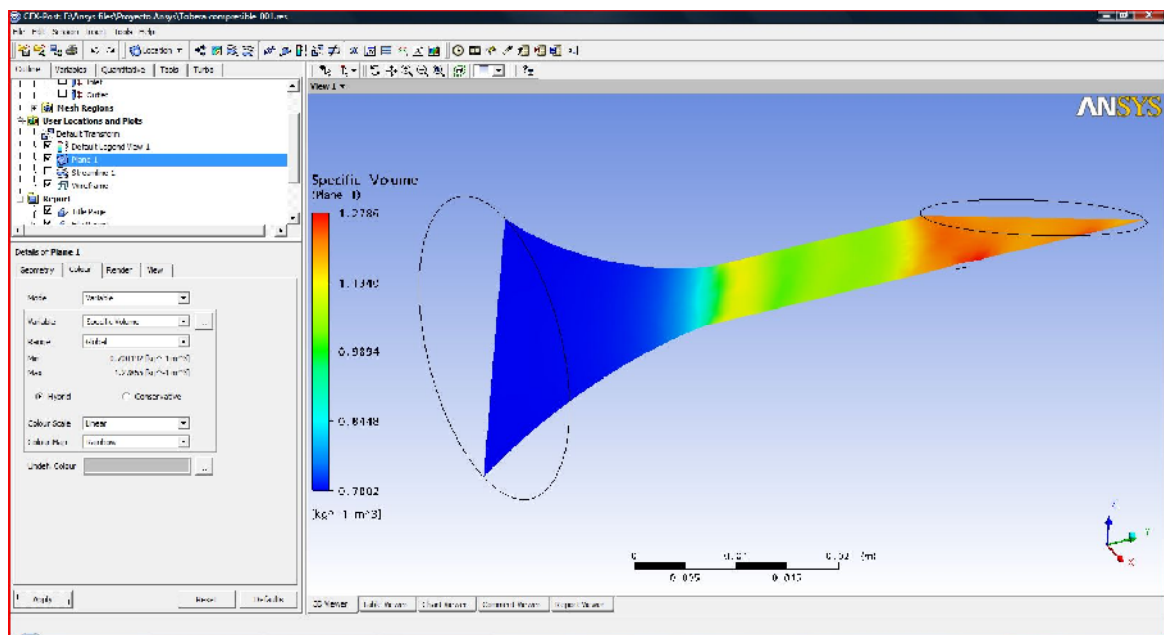


Figura 38. Perfil de Volumen Específico en CFX

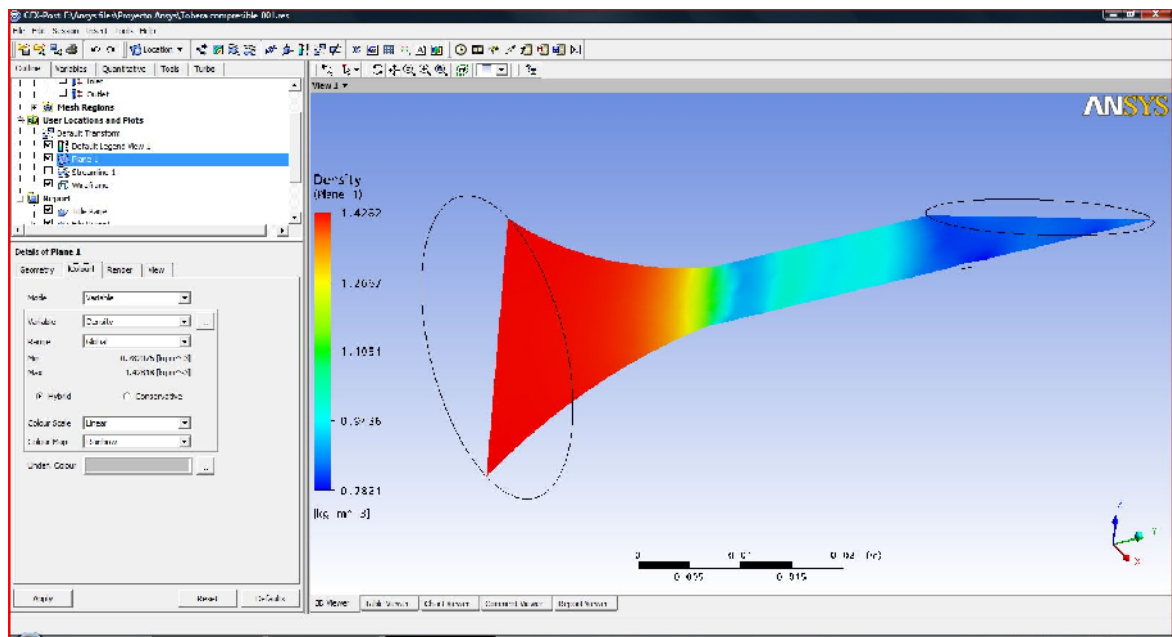


Figura 39. Perfil de Densidad en CFX

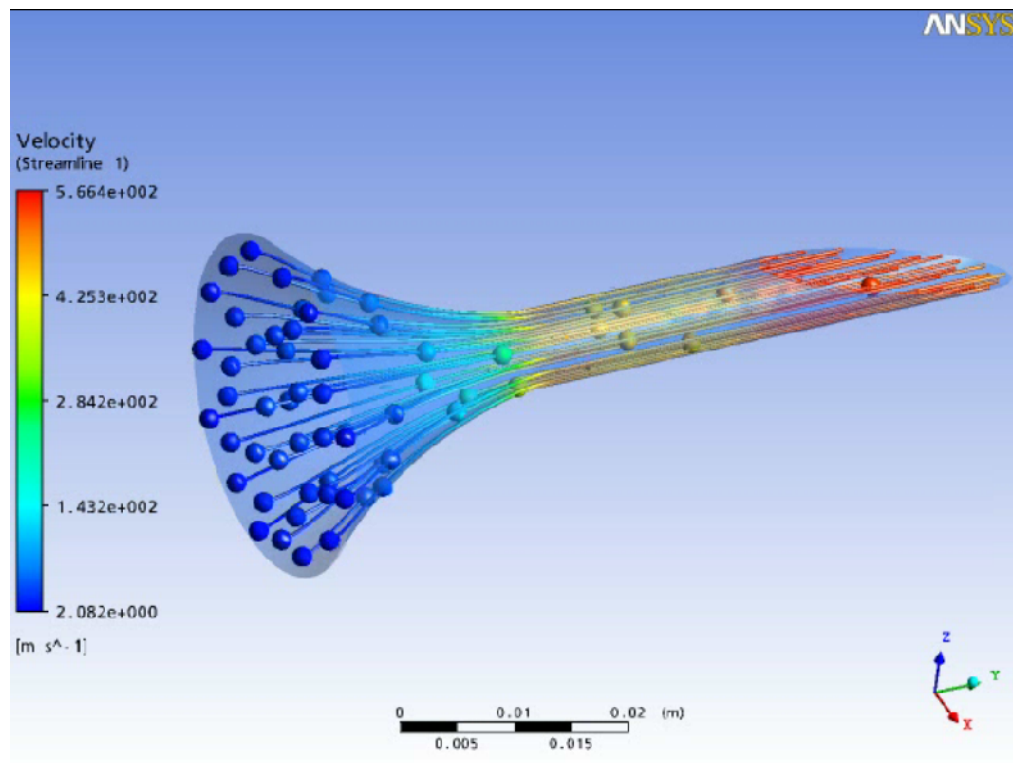


Figura 40. Imagen de Animación con Puntos en CFX

### 6.2.1.5.2 Datos de la Segunda Simulacion Ansys CFX con Refinamiento.

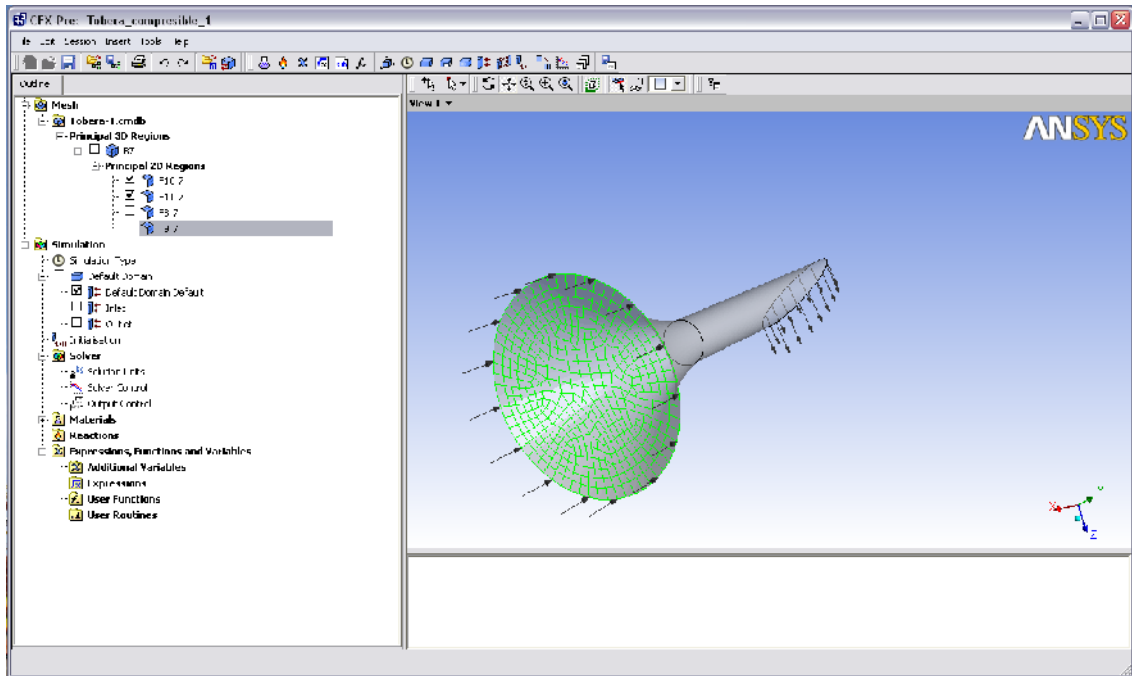


Figura 41. Enmallado para la segunda Simulacion con Refinamiento

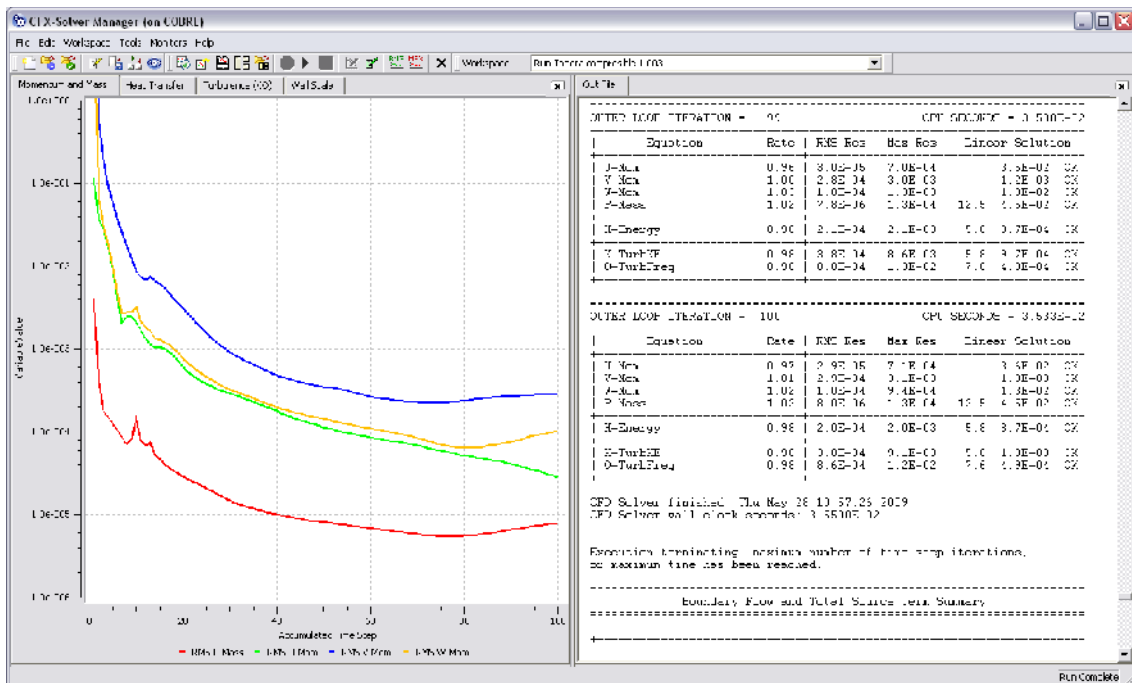


Figura 42. Convergencia del modelo Refinado para la segunda Simulación

| Mesh Information    |       |
|---------------------|-------|
| Number of Nodes:    | 18984 |
| Number of Elements: | 17302 |
| Tetrahedra:         | 0     |
| Wedges:             | 82    |
| Pyramids:           | 0     |
| Hexahedra:          | 17220 |

| TABLA DE RESULTADOS DE LA SIMULACION CON REFINAMIENTO EN CFX |                 |          |          |             |          |                   |                   |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|----------|----------|-------------|----------|-------------------|-------------------|
| Distancia m                                                  | Area Sec. T. m2 | Pmin psi | Pmax psi | Area/flujo  | Vmax m/s | V.Esp. Mín. m3/kg | V.Esp. Máx. m3/kg |
| 0                                                            | 0,000738764     | 49,89    | 50       | 0,042697692 | 32,21    | 0,70019           | 0,7017            |
| 0,005                                                        | 0,000400149     | 49,83    | 49,93    | 0,023127059 | 40,08    | 0,70095           | 0,70234           |
| 0,01                                                         | 0,000213837     | 49,54    | 49,68    | 0,012358949 | 65,4     | 0,70363           | 0,70556           |
| 0,015                                                        | 0,000112106     | 48,49    | 48,82    | 0,006479292 | 119,76   | 0,71325           | 0,71752           |
| 0,02                                                         | 5,94E-05        | 44,67    | 45,21    | 3,43E-03    | 228,11   | 0,75708           | 0,76525           |
| 0,025                                                        | 3,80E-05        | 29       | 32,93    | 2,19E-03    | 459,09   | 0,97103           | 1,07953           |
| 0,03                                                         | 3,80E-05        | 28,54    | 29,23    | 2,20E-03    | 501,11   | 1,07022           | 1,08739           |
| 0,035                                                        | 3,77E-05        | 29,3     | 30,18    | 2,18E-03    | 485,61   | 1,03987           | 1,07042           |
| 0,04                                                         | 3,79E-05        | 29,52    | 30,14    | 2,19E-03    | 486,16   | 1,04498           | 1,06363           |
| 0,045                                                        | 3,71E-05        | 27,58    | 28,46    | 2,14E-03    | 508,98   | 1,08924           | 1,11969           |
| 0,05                                                         | 3,61E-05        | 24,15    | 25,16    | 2,08E-03    | 572,34   | 1,20369           | 1,24494           |
| 0,055                                                        | 2,87E-05        | 23,83    | 25,14    | 1,66E-03    | 562,12   | 1,19871           | 1,2616            |
| 0,06                                                         | 1,97E-05        | 24,83    | 25,48    | 1,14E-03    | 551,62   | 1,19186           | 1,21756           |
| 0,065                                                        | 1,03E-05        | 24,36    | 25,12    | 5,95E-04    | 553,51   | 1,19378           | 1,26378           |
| 0,07                                                         | 2,69E-06        | 25,39    | 25,94    | 1,55E-04    | 537,3    | 1,17922           | 1,19993           |

Tabla 3. Resultados de la Simulación

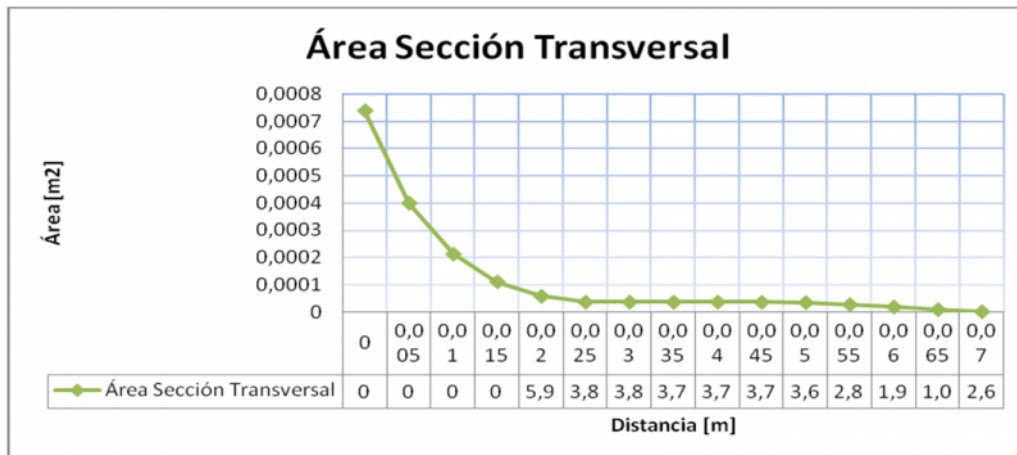


Figura 43. Grafica Area Seccion Transversal de la Tobera



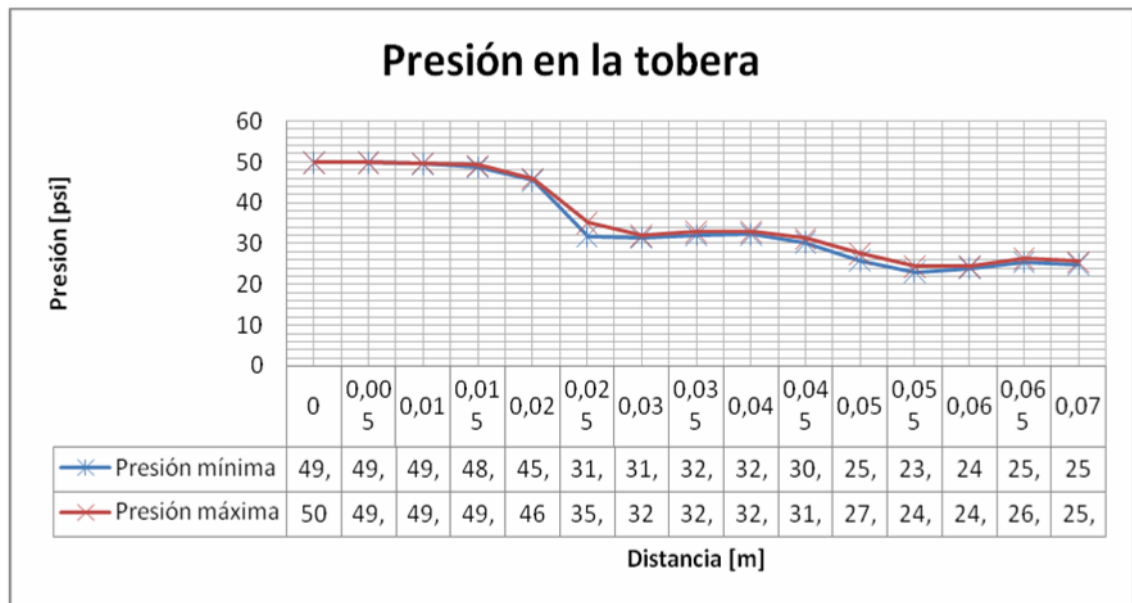


Figura 44. Gráfica de Presión en la Tobera

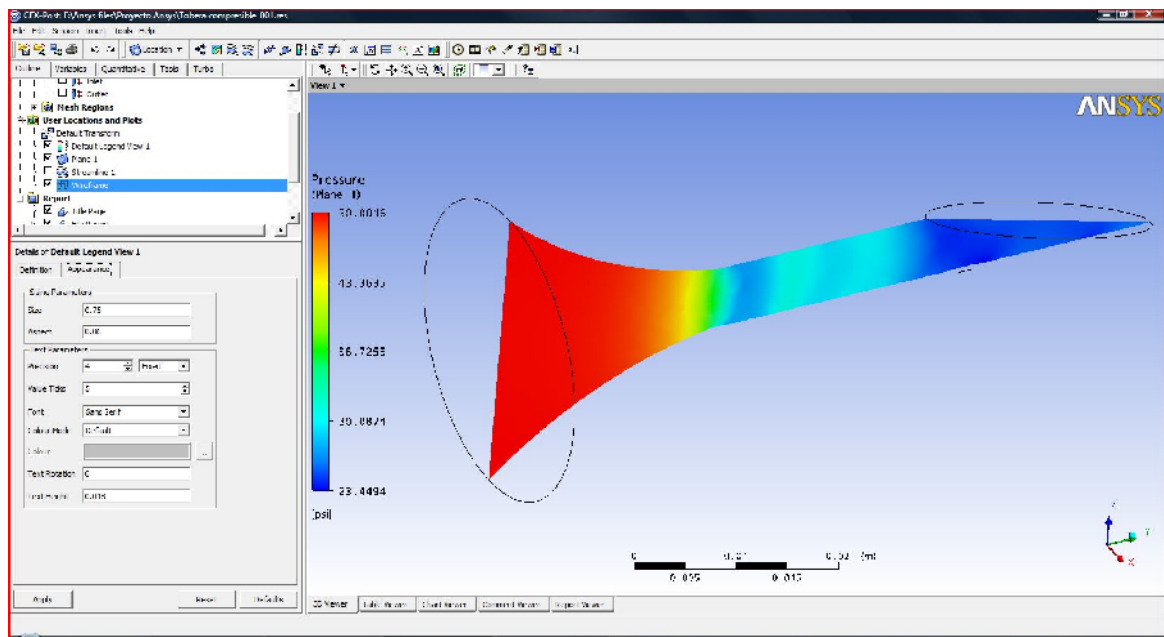
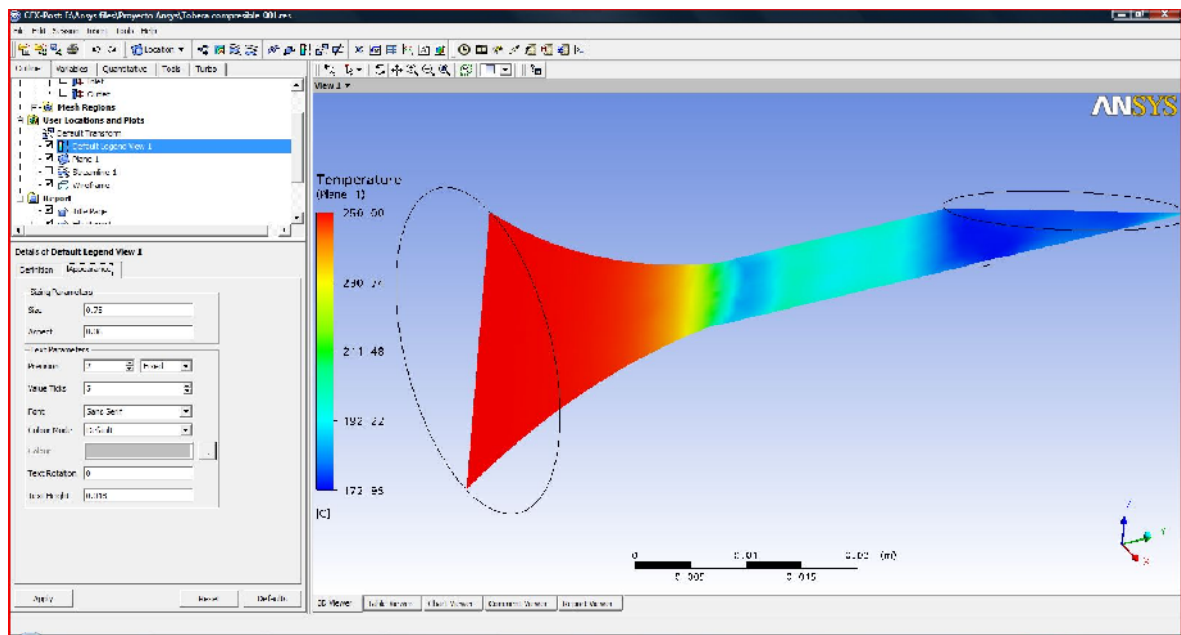
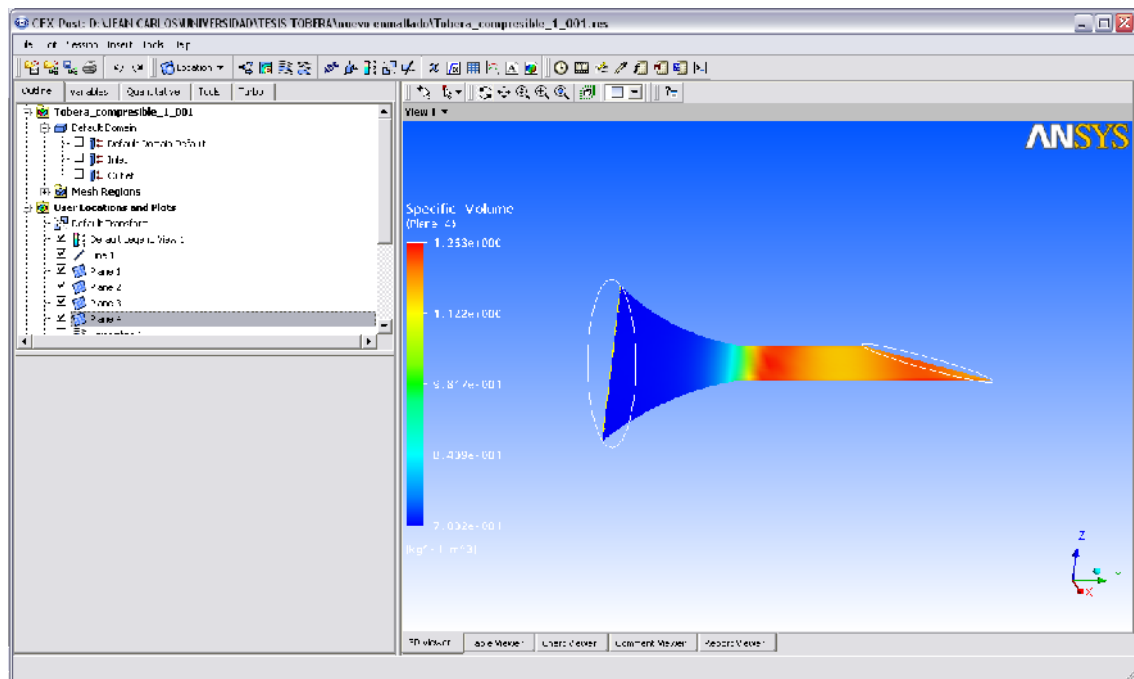


Figura 45. Perfil De Presión para Modelo Refinado





**Figura 48. Perfil de Temperatura para Modelo Refinado.**



**Figura 49. Perfil de Volumen Específico para Modelo Refinado.**

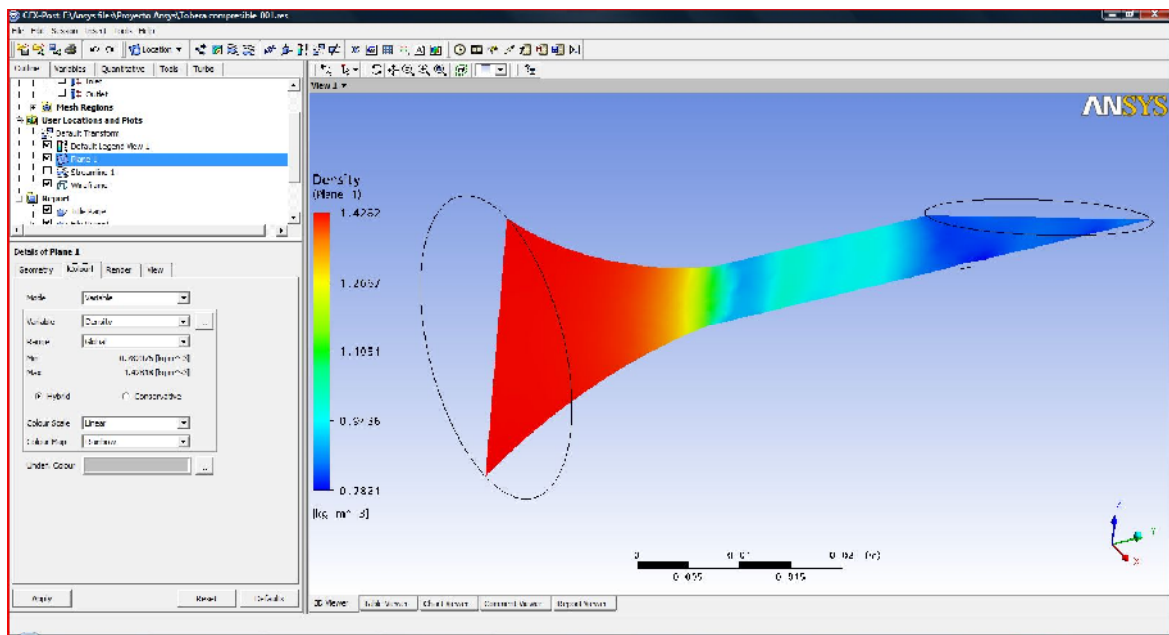


Figura 50. Perfil de Densidad para Modelo Refinado

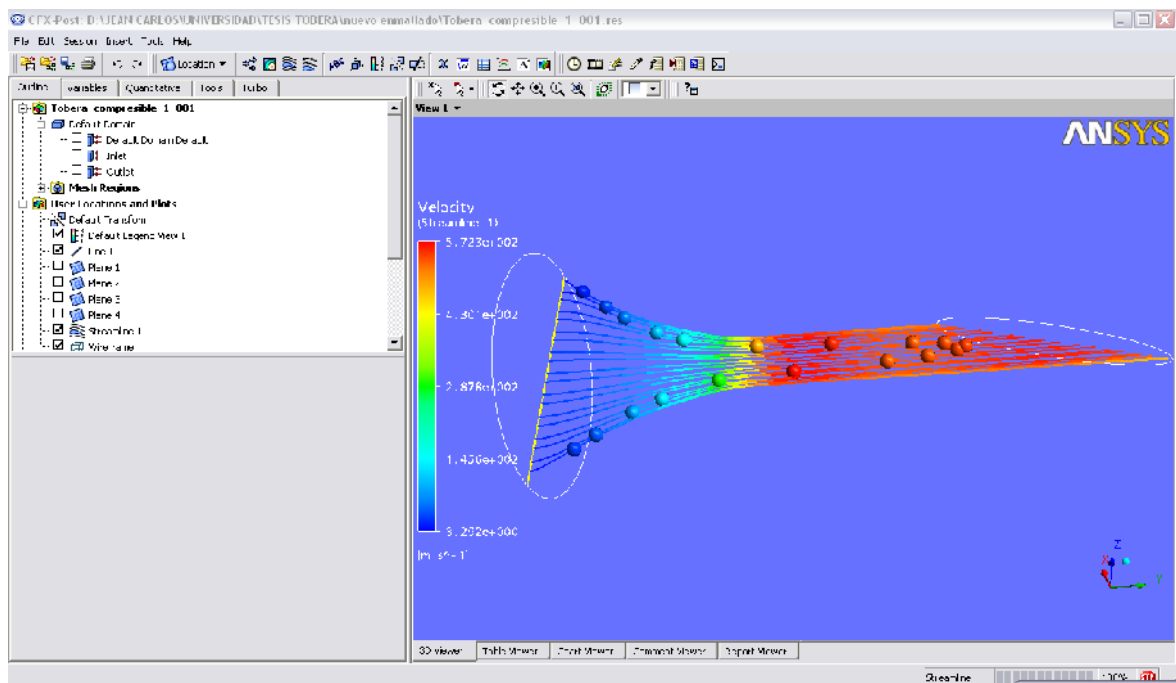


Figura 51. Imagen de Animación en Plano CFX.

### 6.2.2 Análisis De Resultado De CFX

En el análisis de la convergencia que se muestra en la figura 35, se puede observar que el programa realizó 100 iteraciones, éste resultado nos garantiza un rango de exactitud requerida para que la solución este lo más cerca posible a los valores deseados, este metodo de convergencia es un método aproximado el cual busca un porcentaje de error mínimo, en la figura 26 encontramos un modelo de convergencia donde se realizaron 69 de 100 iteraciones y el programa no pudo encontrar la convergencia lo cual no garantiza que los resultados sean los mas óptimos para el estudio. Finalmente se realizó un refinamiento al enmallado del modelo ver figura 42 para obtener un resultado más preciso al modelamiento matemático, donde se obtuvo que el modelo converge ver figura 43.

En la Figura 44, se muestra el cálculo del área transversal con respecto a la longitud de la tobera con esto se puede decir que a la salida de la tobera se encuentra menor, ya que el área de sección transversal de una tobera disminuye en la dirección del flujo, en el caso de flujos subsónicos que es nuestra tobera en analizar.

En la distribución de presión a través de la tobera que muestra en la figura 46, encontramos que la presión disminuye durante el recorrido que hace el vapor en la tobera. Como se observa hay una caída de presión significativa en la garganta esto es debido al cambio en el área.

Esta disminución de presión que se presenta en la tobera es por el aumento de la velocidad, ya que esta es inversamente proporcional a la presión.

La presión en la garganta es 35,93 psi, y de salida de 25 psi conocida.

Como se puede observar en la figura 47, la velocidad del vapor aumenta en función del recorrido que hace en la tobera y esto es debido a la disminución que hay en el área de esta. El comportamiento de la velocidad muestra un aumento exponencial desde la entrada hasta una distancia 2,5 cm, que es donde se encuentra la garganta de la tobera, en este punto el flujo comienza a ganar velocidad uniforme debido al área constante en la tobera.

Como resultados de la simulación que se observa en la gráfica 48, se tiene una velocidad a la salida de 572,3m/s.

En la figura 49 tenemos el perfil de temperatura donde observamos cómo tiene una caída brusca en la garganta, y visualizamos que su comportamiento después de la garganta tiende a ser constante la temperatura en  $T:190\text{ }^{\circ}\text{C}$  y termina saliendo el vapor de la tobera a  $T_s:172,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En la figura 50, analizamos el perfil de volumen específico, en donde su comportamiento tiende a aumentar en sentido del flujo, éste mismo es inversamente proporcional al perfil de temperatura, su resultado de entrada es  $0,7002\text{ m}^3/\text{kg}$  y a la salida tenemos un volumen específico de  $1,2786\text{ m}^3/\text{kg}$ .

El perfil de densidad que vemos en la figura 51, muestra que el vapor en la entrada es más denso, esto lo relacionamos porque en este punto de la tobera se encuentra el volumen específico máximo, esta conclusión la tenemos ya que la densidad es la masa sobre volumen.

### 6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL EES Y EL CFX

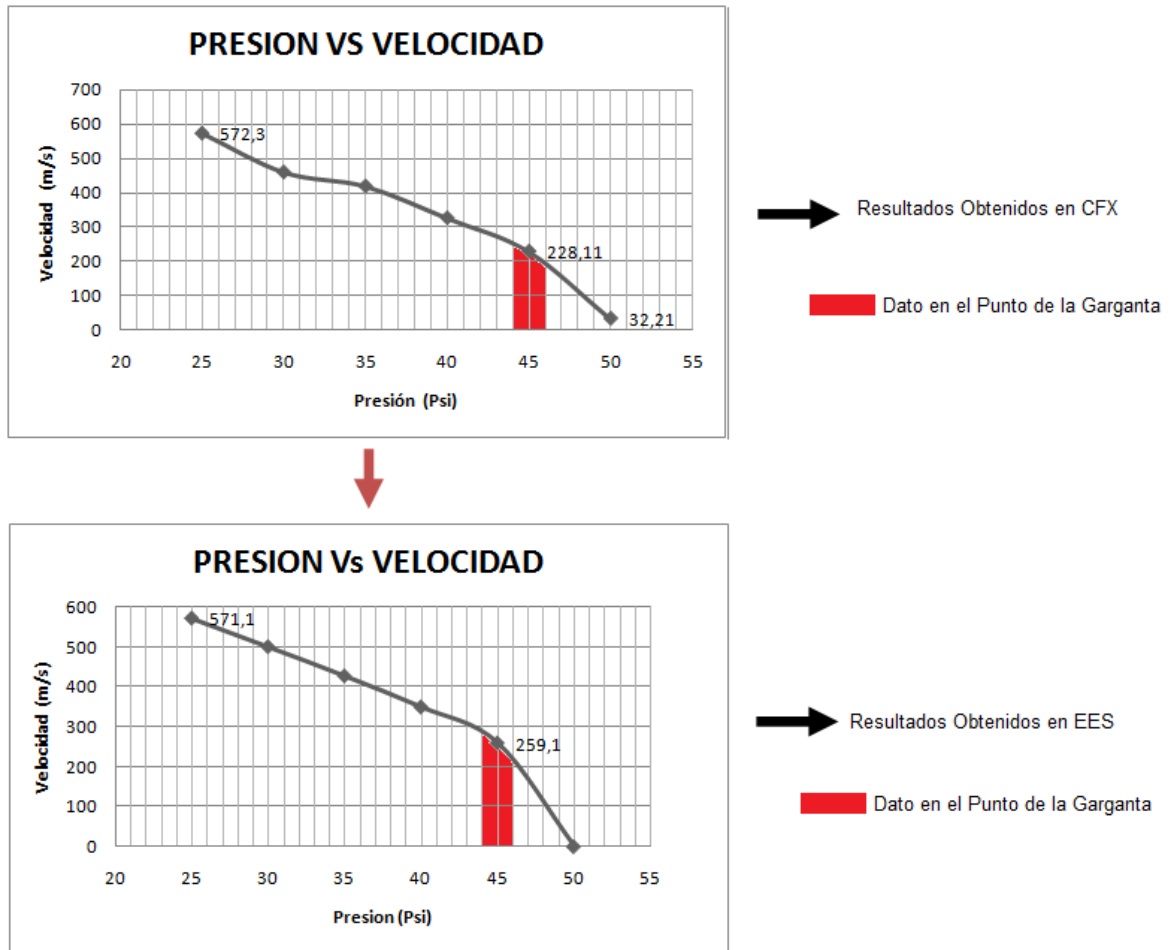


Figura 52. Comparación de Resultados de Velocidad

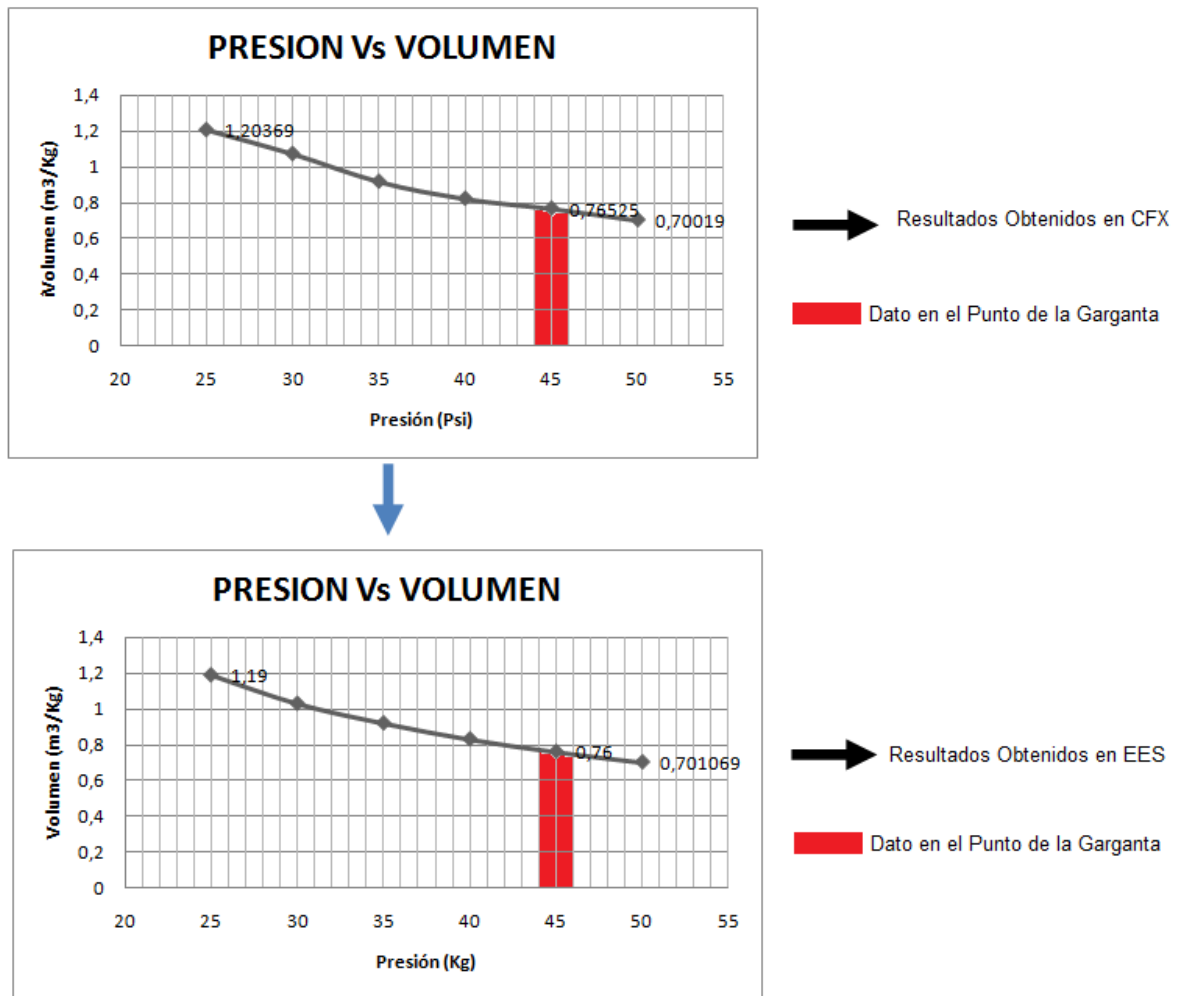


Figura 53. Comparación de Resultados de Volumen



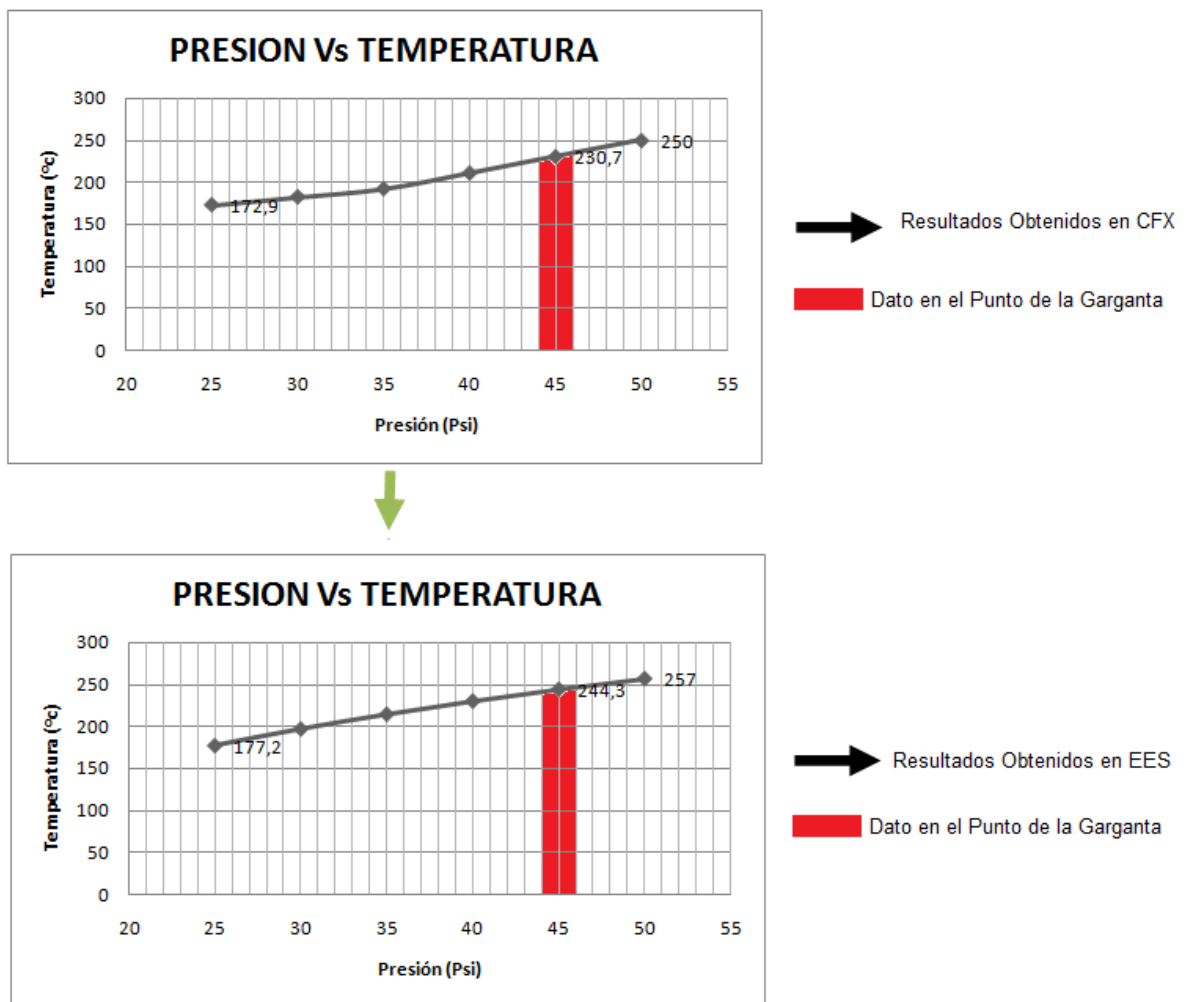


Figura 54. Comparación de Resultados de Temperatura

### 6.3.1 Análisis de Resultados de la Comparación

En el comportamiento de la velocidad, se demuestra que los resultados obtenidos tienden a comportarse de similar forma, con esto se puede decir que hay una pequeña variación de los valores de velocidad entre cada programa utilizado.

Como se demuestra en la figura 53, se tiene una velocidad de salida para el CFX de 572,3 m/s y para el EES un valor de 571,1m/s.

De acuerdo a lo anterior se puede decir que en el CFX obtenemos valores mas cercanos a la realidad pero es de notar que el programa EES nos da una base para saber que tan preciso son los datos en el CFX.

Como se observa en la figura 54 donde se muestra los valores obtenidos del volumen con respecto a la presión, se demuestra que el comportamiento tanto en el CFX como en el EES son de las mismas características, ya que en las dos gráficas muestran la misma tendencia.

Los datos que arroja la simulación y el cálculo matemático hecho en el EES se tiene valores mas cercanos tanto en la entrada como en la salida; en la entrada se tiene para el CFX un valor de 0,70m<sup>3</sup>/kg y para el EES un valor de 0,76m<sup>3</sup>/kg y para la salida un valor de 1,20m<sup>3</sup>/kg y 1,19m<sup>3</sup>/kg respectivamente.

En el perfil de temperatura de la figura 55, se ilustra el comportamiento de esta; cuando hace el recorrido por la tobera, los resultados entre cada uno de los programas estan cercanos tanto en la entrada de la tobera como en la salida, esto nos garantiza que los resultados obtenidos tanto en el modelo matemático y el proceso de la simulación se ajustan a la realidad.

Las dos gráficas presentan una tendencia decreciente en la temperatura siendo la temperatura de entrada mayor a la de la salida.

## **7 PERSONAS QUE PARTICIPARON DEL PROYECTO**

- Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga – UPB
- Facultad de Ingeniería Mecánica
- Emil Hernández Arroyo

## 8 CONCLUSIONES

- El modelamiento matemático nos dio a conocer el comportamiento del flujo de vapor desde que entra a la tobera hasta el momento que sale, de los datos obtenidos en este modelamiento se pudo graficar las diferentes variables como temperatura, velocidad, relación Area/Fujo, volumen específico con respecto a la presión ya que esta es la variable que se manipula en el sistema.
- Al graficar la variable de velocidad conocimos el valor de esta a diferentes presiones, en donde el mayor interés era determinar el valor en la salida, debido a que a esta velocidad el vapor impacta a los alabes.
- El análisis nos permitió determinar que la tobera con la que cuenta la turbina de la planta de la Universidad Pontificia Bolivariana es convergente debido a los valores hallados en el modelo matemático.
- Se realizó la geometría de la tobera basados en planos que se tomaron del laboratorio, esto nos permitió tener el modelo para simularlo en CFX y conocer el comportamiento del fluido en una forma mas detallada, en donde observamos que en la garganta es donde se presenta los mayores cambios de velocidad, presión, volumen específico ya que el vapor en este punto es donde se acelera, perdiendo presión debido al estrangulamiento que se presenta.

- La comparación de los datos obtenidos tanto el matemático como el de la simulación nos permitió corroborar que en las graficas se compartan de similar forma, así mismo los valores de las variables están muy cercanas, de acuerdo a lo anterior se puede afirmar que en el CFX obtenemos un comportamiento (PERFILES) mas cercano a la realidad, pero es de anotar que el modelo matemático (EES) nos da una base para saber que tan precisos son los datos obtenidos en el CFX.
- El calculo de la eficiencia nos permitió determinar que la tobera esta actualmente trabajando en un rango normal de operación igual a 83%.

## BIBLIOGRAFIA

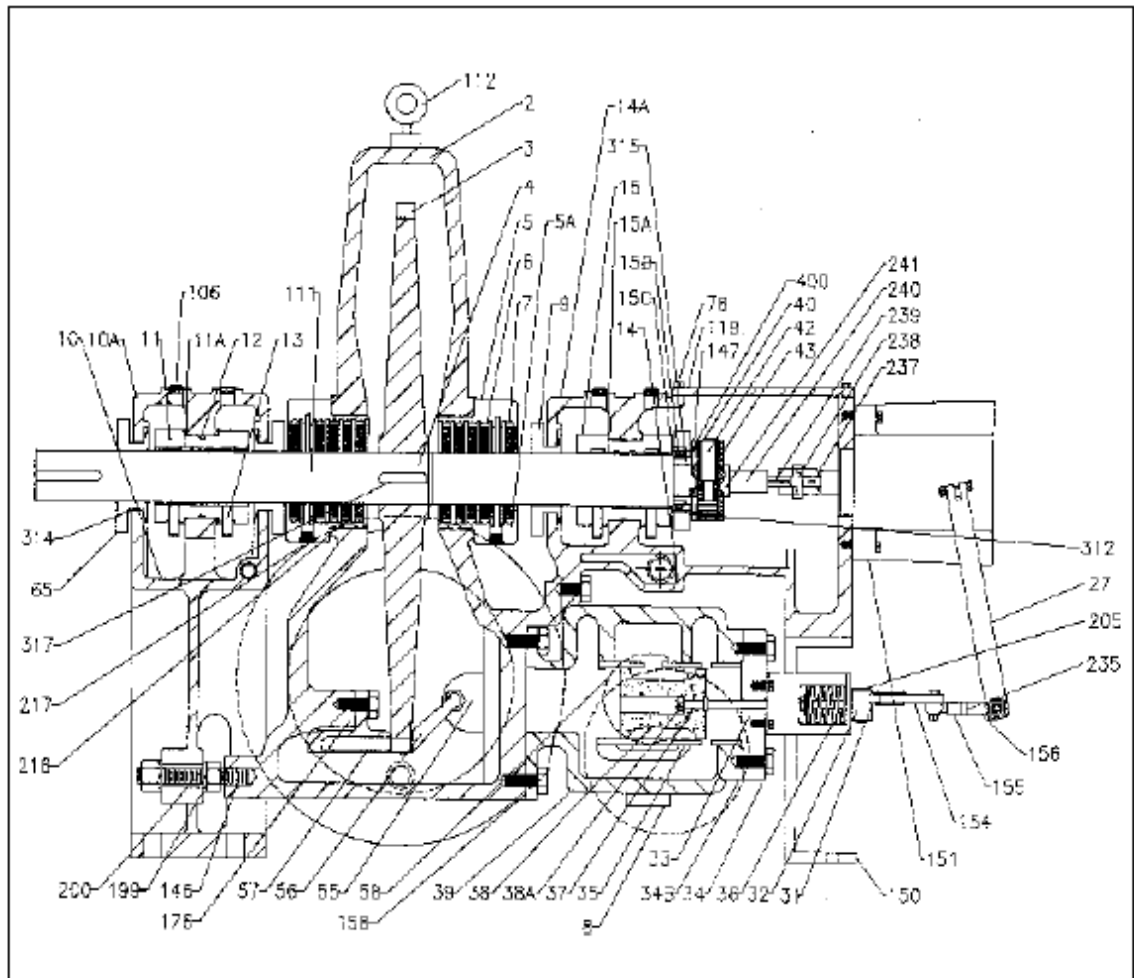
- [1] Ansys Inc./CFX/CFX-10.0/help/pdf.
- [2] Arango Diego López. Termodinámica. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 1990.
- [3] Cengel Yunus A. y Boles Michael A. Termodinámica: Tomo II. Segunda edición. U.S.A. McGraw-Hill. 1997.
- [4] Díez Pedro Fernández. Turbinas Hidráulicas. Departamento de Energía Eléctrica y energética: Universidad de Cantabria.
- [5] Faires Moring Virgil. Termodinámica. Limusa. 2004.
- [6] Jones. J.B. Ingeniería Termodinámica. Prentice Hall. 1997.
- [7] Mataix Claudio. Turbomaquinas Térmicas .Turbina de vapor 1998.
- [8] Potter C. Merle. Termodinámica para ingenieros. McGraw Hill. 2004
- [9] Shames Irving H. Mecánica de Fluidos 3 ed. McGraw Hill 1995.
- [10] Shapiro, Ascher H. The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. John Wiley & Sons, Inc. 1964.
- [11] Villalobos Ordus Gustavo. Medición de Flujo : Placas de Orificio Toberas de Flujo y Tubos Venturi.

## ANEXOS

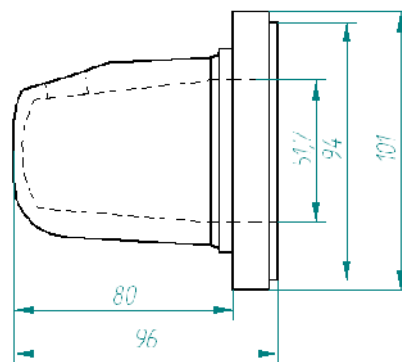
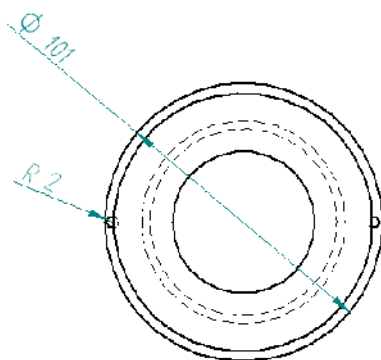
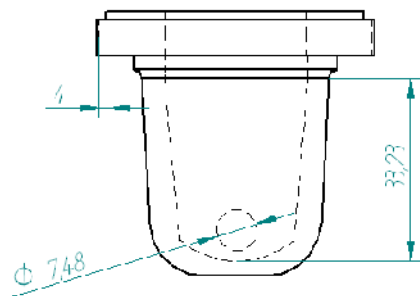
### ANEXO A. PLANO DE LA TURBINA

SKINNER  
S-Series  
Page 45

SECTIONAL ARRANGEMENTS

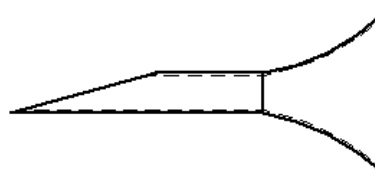
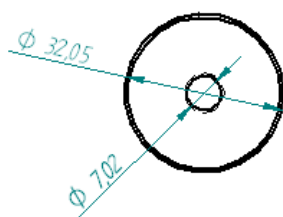
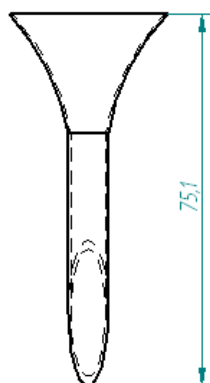


## ANEXO B. PLANO DE LA TOBERA.



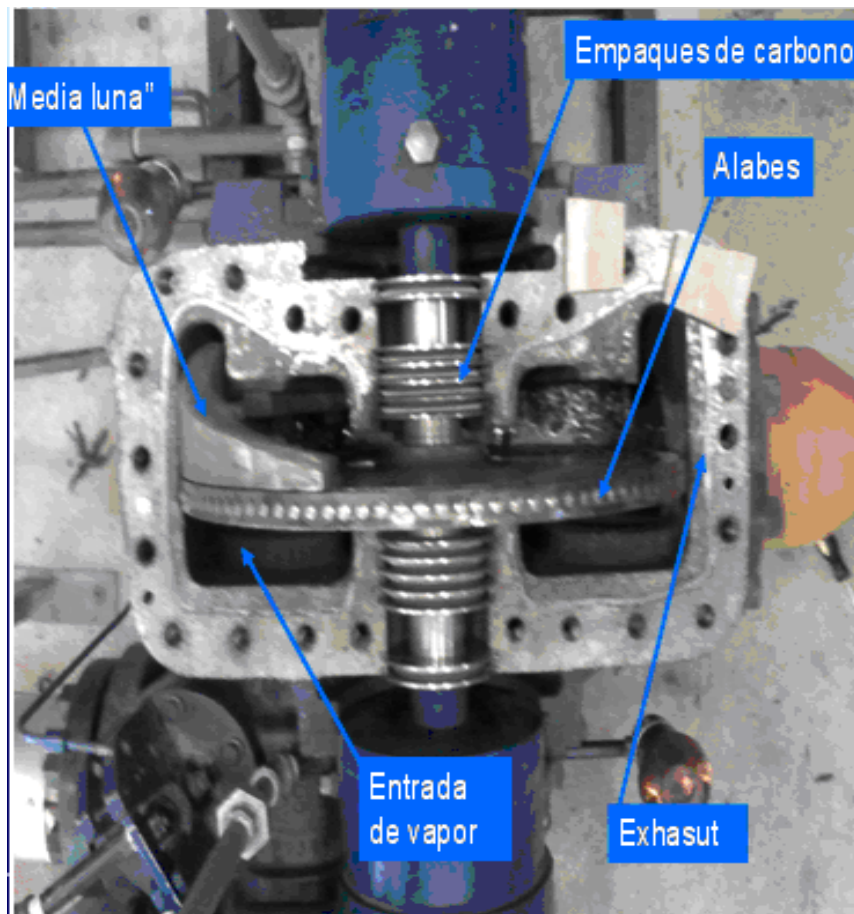


# ANEXO C. PLANO DE PERFIL DE LA TOBERA.



#### ANEXO D. FOTOS DE LA TURBINA .





## ANEXO E. FOTOS DE LA TOBERA



## ANEXO F. CALCULOS

$$\alpha_1 = 20^\circ$$

$$\beta_1 = \beta_2$$

$$C_2 = k C_1 \approx k = 0,95$$

$$\mu = W R$$

$$\mu = 376,9 \frac{rad}{seg} * 0,23 m$$

$$\mu = 86,687 \frac{m}{seg}$$

$$W = N \times \frac{2\pi}{60}$$

$$W = 3600 \times \frac{2\pi}{60}$$

$$W = 376,9 \frac{rad}{seg}$$

$$ESCALA \quad 10mm = 30m/seg$$

$$U = 2,89 = 86,687m/seg$$

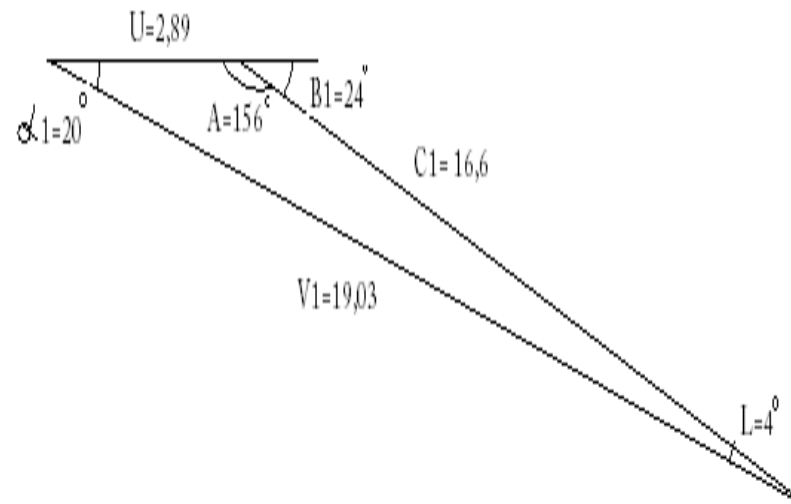
$$V1 = 19,03 = 571,1m/seg$$

$$V2 = 13 = 390 m/seg$$

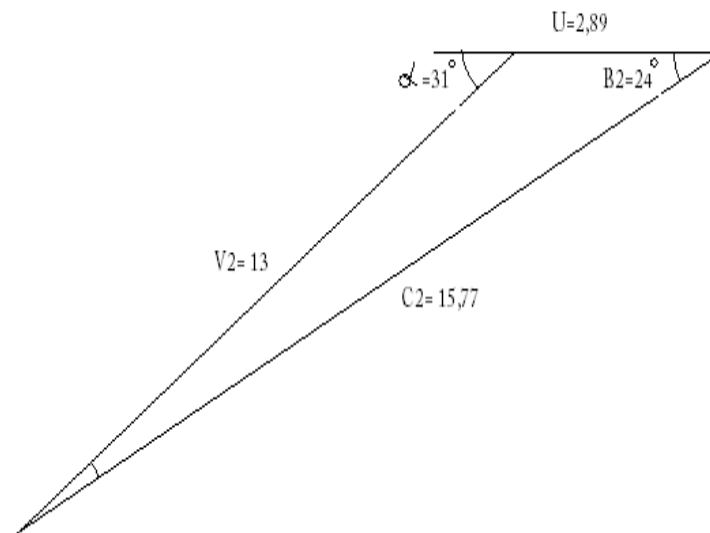
$$C1 = 16,6 = 498 m/seg$$

$$C2 = 15,77 = 473,1m/seg$$

### TRIANGULO DE ENTRADA



### TRIANGULO DE SALIDA



$$\dot{m} = 0,00583 \frac{kg}{seg}$$

$$Ec = \frac{1}{2} \dot{m} v_1^2 = \frac{v_1^2}{2} \dot{m}$$

$$Ec = \left[ \frac{571,1 m / seg}{2} \right]^2 * 0,00583 kg / seg$$

$$Ec = \left[ 163077,60 \frac{m^2}{seg^2} \right] * 0,00583 kg / seg$$

$$Ec = 950,74 \frac{kg * m^2}{seg^3}$$

$$Ec = 950,74 \frac{N * m}{seg}$$

$$Ec = 950,74 \frac{Julios}{seg}$$

$$Ec = 950,74 W$$

$$POT_{Transmitida} = \dot{m} u (v_1 \cos \alpha_1 + v_2 \cos \alpha_2)$$

$$POT_{Transmitida} = 0,00583 \frac{kg}{seg} * 86,687 \frac{m}{seg} (571,1 \frac{m}{seg} \cos 20^\circ + 390 \frac{m}{seg} \cos 31^\circ)$$

$$POT_{Transmitida} = 0,50538 \frac{kg * m}{seg^2} (870,945) \frac{m}{seg}$$

$$POT_{Transmitida} = 440,158 \frac{kg * m^2}{seg^3}$$

$$POT_{Transmitida} = 440,158 \frac{N * m}{seg}$$

$$POT_{Transmitida} = 440,158 \frac{Julios}{seg}$$

$$POT_{Transmitida} = 440,158 W$$

$$n_{Alabe} = \frac{POT_{Transmitida}}{POT_{Disponible}}$$

$$n_{Alabe} = \frac{440,158 \text{ W}}{950,74 \text{ W}}$$

$$n_{Alabe} = 46,29$$

$$n_{Tobera} = \frac{Real}{Ideal} = \left[ \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} \right]$$

$$n_{Tobera} = \frac{1285 - 1233,44}{1285 - 1215}$$

$$n_{Tobera} = 73.71\%$$

Para los datos hallados en la entalpia (h2), tomamos los valores a la salida de turbina ya que no podiamos tomar un dato exacto en la salida de la tobera; Basados en los principios termodinamicos en donde no hay caida de entalpias en el transcurso de la salida de la tobera a la salida de la turbina ya que es una turbina de impulso.



## ANEXO G. REPORTE DE LA SIMULACIÓN ANSYS CFX.



---

### CONTENIDO

#### [1. File Report](#)

[Table 1](#) File Information for Tobera compresible\_001

#### [2. Mesh Report](#)

[Table 2](#) Mesh Information for Tobera compresible\_001

#### [3. Physics Report](#)

[Table 3](#) Domain Physics for Tobera compresible\_001

[Table 4](#) Boundary Physics for Tobera compresible\_001

#### [4. Solution Report](#)

[Table 5](#) Boundary Flows for Tobera compresible\_001

---

### 1.ARCHIVO DEL REPORTE

| Table 1. File Information for Tobera compresible_001 |                                                          |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Case                                                 | Tobera compresible_001                                   |
| File Path                                            | F:\Ansys files\Proyecto Ansys\Tobera compresible_001.res |
| File Date                                            | 29 March 2009                                            |

|              |                 |
|--------------|-----------------|
| File Time    | 05:35:56 PM     |
| File Type    | CFX5            |
| File Version | 11.0            |
| Fluids       | Water Ideal Gas |
| Solids       | None            |
| Particles    | None            |

## 2. REPORTE DE MALLA

| Table 2. Mesh Information for Tobera compresible_001 |       |          |
|------------------------------------------------------|-------|----------|
| Domain                                               | Nodes | Elements |
| Default Domain                                       | 18984 | 17302    |

## 3. REPORTE FÍSICO

| Table 3. Domain Physics for Tobera compresible_001 |          |       |                 |                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------|----------|-------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Name                                               | Location | Type  | Materials       | Models                                                                                                                                                             |
| Default Domain                                     | B7       | Fluid | Water Ideal Gas | Heat Transfer Model = Total Energy<br>Turbulence Model = SST<br>Turbulent Wall Functions = Automatic<br>Buoyancy Model = Non Buoyant<br>Domain Motion = Stationary |

| Table 4. Boundary Physics for Tobera compressible_001 |                        |              |        |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------|------------------------|--------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Domain                                                | Name                   | Location     | Type   | Settings                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Default Domain                                        | Inlet                  | F9.7         | Inlet  | Flow Direction = Normal to Boundary Condition<br>Flow Regime = Subsonic<br>Heat Transfer = Static Temperature<br>Static Temperature = 250 [C]<br>Mass And Momentum = Total Pressure<br>Relative Pressure = 50 [psi]<br>Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio |
| Default Domain                                        | Outlet                 | F8.7         | Outlet | Flow Regime = Subsonic<br>Mass And Momentum = Average Static Pressure<br>Relative Pressure = 25 [psi]<br>Pressure Averaging = Average Over Whole Outlet                                                                                                                       |
| Default Domain                                        | Default Domain Default | F10.7, F11.7 | Wall   | Heat Transfer = Adiabatic<br>Wall Influence On Flow = No Slip                                                                                                                                                                                                                 |

#### 4. REPORTE DE SOLUCIÓN

| Table 5. Boundary Flows for Tobera compresible_001 |          |             |            |             |             |
|----------------------------------------------------|----------|-------------|------------|-------------|-------------|
| Location                                           | Type     | Mass Flow   | Momentum   |             |             |
|                                                    |          |             | X          | Y           | Z           |
| Default Domain Default                             | Boundary | 0.0000e+00  | -1.6848e02 | -2.3873e+02 | 2.4317e+01  |
| Inlet                                              | Boundary | 1.7302e-02  | 4.7373e-06 | 2.5486e+02  | 2.0752e-05  |
| Outlet                                             | Boundary | -1.7305e-02 | 1.6842e-02 | -1.6128e+01 | -2.4317e+01 |

## ANEXO H. CÓDIGO PARA LA FUNCIÓN DE LA TOBERA EN MATLAB (Po,To,N,PS)

Se contiene el código de ejecución de la interfaz gráfica del programa y las condiciones de datos de entrada y se ejecuta la función (tobera) que contienen el código principal.

```
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

po=str2num(get(handles.txtpo, 'String'));
to=str2num(get(handles.txtto, 'String'));
ps=str2num(get(handles.txtps, 'String'));
n=str2num(get(handles.txtn, 'String'));

if po>60
warndlg ('el valor maximo de po es 60 psi ..','ERROR')
return
end

if po<40
warndlg ('el valor minimo de po es 40 ..','ERROR')
return
end

if to>1700
warndlg ('el valor maximo de to es 1700 F ..','ERROR')
return
end

if to<450
warndlg ('el valor minimo de to es 450 F ..','ERROR')
return
end

if ps>40
warndlg ('el valor maximo de ps es 40 psi ..','ERROR')
return
end

if ps<20
warndlg ('el valor minimo de ps es 20 psi ..','ERROR')
return
end
```

```

if n>20
warndlg ('el valor maximo de n es 20 ..','ERROR')
return
end

if n<5
warndlg ('para aire el valor minimo de n es 5 ..','ERROR')
return
end

tobera(po,to,n,ps);

```

b. Se crea la función principal que determina y los datos y los grafica (los pasos se muestran en el código líneas de color verde)

```
function tobera(po,to,n,ps)
```

Con los datos de entrada po y to determinamos las propiedades a la entrada

En el caso que toque interpolar es decir presiones diferentes a las que hay en las tablas de vapor que contiene el programa para una temperatura dada to determina las propiedades de v=vol h=entalpia s=entropia después creamos una tabla

```
INTERPOLAR=0;
```

CASO EN QUE LA PRESION ENTRE 60 Y 40 DETERMINAMOS LAS PROPIEDADES A P1=60 Y P2=40 A TO

```

if po<60 && po>40
p1=60;
[v1,h1,s1] = propinivapor(60,to);
p2=40;
[v2,h2,s2] = propinivapor(40,to);
INTERPOLAR=1;
End

```

CASO EN QUE LA PRESION ENTRE PRESION ENTRE 40 Y 29 DETERMINAMOS PROPIEDADES A P1=40 Y P2= 29 A TO

```
if po<40 && po>29
p1=40;
[v1,h1,s1] = propinivapor(40,to);
p2=29;
[v2,h2,s2] = propinivapor(29,to);
INTERPOLAR=1;
end
```

CASO EN QUE LA PRESION ENTRE 29 Y 20 DETERMINAMOS PROPIEDADES A P1=29 Y P2=20

```
if po<29 && po>20
p1=29;
[v1,h1,s1] = propinivapor(29,to);
p2=20;
[v2,h2,s2] = propinivapor(20,to);
INTERPOLAR=1;
end
```

CON LOS DATOS ANTERIORES PARA CADA P1 Y P2 A TO CREAMOS UNA TABLA LLAMADA tabla prop

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| p1 | v1 | h1 | s1 |
| p2 | v2 | h2 | s2 |

obtenemos vo ho so (interpolando en el paso siguiente a po)

```
if INTERPOLAR==1
tablaprop(1,1)=p1;
tablaprop(2,1)=p2;
tablaprop(1,2)=v1;
tablaprop(2,2)=v2;
tablaprop(1,3)=h1;
tablaprop(2,3)=h2;
tablaprop(1,4)=s1;
tablaprop(2,4)=s2;
tablaprop;
vo=interp1(tablaprop(:,1),tablaprop(:,2),po);
ho=interp1(tablaprop(:,1),tablaprop(:,3),po);
so=interp1(tablaprop(:,1),tablaprop(:,4),po);
end
```

En el caso de que la presión de un valor exacto de presión de los cuales estan en tablas, entonces lo tomamos directamente de la tabla

```
if INTERPOLAR==0
[vo,ho,so] = propinivapor(po,to);
end
```

Con el valor de la entropia determino las propiedades para los demas presiones:

PROCESO ISOENTROPICO  $S_0=S$

```
cont=1;
for p=po:-((po-ps)/n):ps
```

En el caso que hay que interpolar proceso igual que descrito para el paso anterior solo que en este caso no interpolo para po si no para so.

```
INTERPOLAR=0;
if p<60 && p>40
p1=60;
[t1,v1,h1] = propisoentvap(60,so);
p2=40;
[t2,v2,h2] = propisoentvap(40,so);
INTERPOLAR=1;
end
```

```
if p<40 && p>29
p1=40;
[t1,v1,h1] = propisoentvap(40,so);
p2=29;
[t2,v2,h2] = propisoentvap(29,so);
INTERPOLAR=1;
end
```

```
if p<29 && p>20
p1=29;
[t1,v1,h1] = propisoentvap(29,so);
p2=20;
[t2,v2,h2] = propisoentvap(20,so);
INTERPOLAR=1;
end
```

```
if INTERPOLAR==1
tablaprop(1,1)=p1;
```



```

tablaprop(2,1)=p2;
tablaprop(1,2)=t1;
tablaprop(2,2)=t2;
tablaprop(1,3)=v1;
tablaprop(2,3)=v2;
tablaprop(1,4)=h1;
tablaprop(2,4)=h2;
tablaprop;
t=interp1(tablaprop(:,1),tablaprop(:,2),p);
v=interp1(tablaprop(:,1),tablaprop(:,3),p);
h=interp1(tablaprop(:,1),tablaprop(:,4),p);
end

```

Caso en el cual no hay que interpolar los datos estan directamente en la tablas

```

if p==60
[t,v,h] = propisoentvap(60,so);
end

```

```

if p==40
[t,v,h] = propisoentvap(40,so);
end

```

```

if p==29
[t,v,h] = propisoentvap(29,so);
end

```

```

if p==20
[t,v,h] = propisoentvap(20,so);
end

```

Ingresamos la fórmula de velocidad

```

vel=sqrt(2*(ho-h)*25036.8556);

```

Creamos los vectores de datos para graficar

```

vecpre(1,cont)=p;
vectem(1,cont)=t;
vecvol(1,cont)=v;
vecvel(1,cont)=vel;
vecent(1,cont)=h;
vecentr(1,cont)=so;

if cont>1
relac=v/vel;
vecrel(1,cont-1)=relac;

```

```

vecpre2(1,cont-1)=p;
vecvol2(1,cont-1)=v;
end
cont=cont+1;
end

```

```

vecpre;
vectem;
vecvol;
vecvel;
vecent;
vecentr;

```

#### GRAFICAMOS

```

figure;
plot(vecpre,vecvel);
title('PRESION VS VELOCIDAD');
xlabel('Presion psi');
ylabel('Velocidad ft/s');
grid on
figure;
plot(vecpre,vecvol);
title('PRESION VS VOLUMEN ESPECIFICO');
xlabel('Presion psi');
ylabel('Volumen especifico ft^3/lbm');
grid on

```

```

figure;
plot(vecpre2,vecvel);
title('PRESION VS RELACION AREA / FLUJO MASICO');
xlabel('Presion psi');
ylabel('Relacion ft^2/lbm/s');
grid on

```

```

figure;
plot(vecvol2,vecvel);
title('VOLUMEN ESPECIFICO VS RELACION AREA / FLUJO MASICO');
xlabel('Volumen especifico ft^3/lbm');
ylabel('Relacion ft^2/lbm/s');
grid on

```

Esta función calcula las propiedades iniciales del vapor a partir de las tablas de vapor para una po de 60 40 0 29 psi a una to:

```
function [v,h,s] = propinivapor(po,to)
```

Funcion que determina las propiedades iniciales del vapor

```
ERROR=1;
```

```
if po==60;
TABLA60PSI=Tabla60psi;
if to>=TABLA60PSI(1,1) && to<=TABLA60PSI(15,1);
v=interp1(TABLA60PSI(:,1),TABLA60PSI(:,2),to);
h=interp1(TABLA60PSI(:,1),TABLA60PSI(:,3),to);
s=interp1(TABLA60PSI(:,1),TABLA60PSI(:,4),to);
ERROR=0;
end
end
```

```
if po==40;
TABLA40PSI=Tabla40psi;
if to>=TABLA40PSI(1,1) && to<=TABLA40PSI(14,1)
v=interp1(TABLA40PSI(:,1),TABLA40PSI(:,2),to);
h=interp1(TABLA40PSI(:,1),TABLA40PSI(:,3),to);
s=interp1(TABLA40PSI(:,1),TABLA40PSI(:,4),to);
ERROR=0;
end
end
```

```
if po==29;
to=(to+459.67)/1.8;( PASAMOS LA T A K )
TABLA29PSI=Tabla29psi;
if to>=TABLA29PSI(1,1) && to<=TABLA29PSI(16,1)
v=interp1(TABLA29PSI(:,1),TABLA29PSI(:,2),to);
h=interp1(TABLA29PSI(:,1),TABLA29PSI(:,3),to);
s=interp1(TABLA29PSI(:,1),TABLA29PSI(:,4),to);
v=v/0.0624; (PASAMOS EL VOL DE M3/KG A FT3/LB)
h=h/2.326; ( PASAMOS H DE KJ/KG A BTU/LB)
s=s/4.1868; ( PASAMOS S DE KJ/KG K A BTU/LB R)
ERROR=0;
end
end
```

```
if po==20;
TABLA20PSI=Tabla20psi;
if to>=TABLA20PSI(1,1) && to<=TABLA20PSI(15,1)
v=interp1(TABLA20PSI(:,1),TABLA20PSI(:,2),to);
h=interp1(TABLA20PSI(:,1),TABLA20PSI(:,3),to);
s=interp1(TABLA20PSI(:,1),TABLA20PSI(:,4),to);
```

```
ERROR=0;end
end
```

```
if ERROR==1
warndlg ('Los datos estan fuera de las tablas del programa
..','ERROR')
end
```

Esta función determina las propiedades a partir de las tablas de vapor que tienen el programa para una po a 60 40 o 29 psi para una (s) dada esta determina las propiedades isoentrópicas del vapor

```
function [ti,vi,hi] = propisoentvap(p,s)
```

Funcion que determina propiedades isoentropicas del vapor:

```
if p==60
TABLA60PSI=Tabla60psi;
vi=interp1(TABLA60PSI(:,4),TABLA60PSI(:,2),s);
hi=interp1(TABLA60PSI(:,4),TABLA60PSI(:,3),s);
ti=interp1(TABLA60PSI(:,4),TABLA60PSI(:,1),s);
end
```

```
if p==40
TABLA40PSI=Tabla40psi;
vi=interp1(TABLA40PSI(:,4),TABLA40PSI(:,2),s);
hi=interp1(TABLA40PSI(:,4),TABLA40PSI(:,3),s);
ti=interp1(TABLA40PSI(:,4),TABLA40PSI(:,1),s);
end
```

```
if p==29
s=s*4.1868; (PASAMOS S DE BTU/LB R A KJ/KG K)
TABLA29PSI=Tabla29psi;
vi=interp1(TABLA29PSI(:,4),TABLA29PSI(:,2),s);
hi=interp1(TABLA29PSI(:,4),TABLA29PSI(:,3),s);
ti=interp1(TABLA29PSI(:,4),TABLA29PSI(:,1),s);
vi=vi/0.0624; PASAMOS VOLUMEN DE M3/KG A FT3/LB
hi=hi/2.326; PASAMOS LA H DE KJ/KG A BTU/LB
ti=1.8*ti-459.67; PASAMOS LA TEMPERATURA DE K A F
end
```

```
if p==20
TABLA20PSI=Tabla20psi;
vi=interp1(TABLA20PSI(:,4),TABLA20PSI(:,2),s);
hi=interp1(TABLA20PSI(:,4),TABLA20PSI(:,3),s);
ti=interp1(TABLA20PSI(:,4),TABLA20PSI(:,1),s);
end
```

Las funciones tabla de 60 40 y 29 tienen las tablas de vapor para las presiones que su nombre indica es de hay donde los códigos extraen los valores para realizar los determinados cálculos

PROGRAMA

## ANALISIS TOBERA

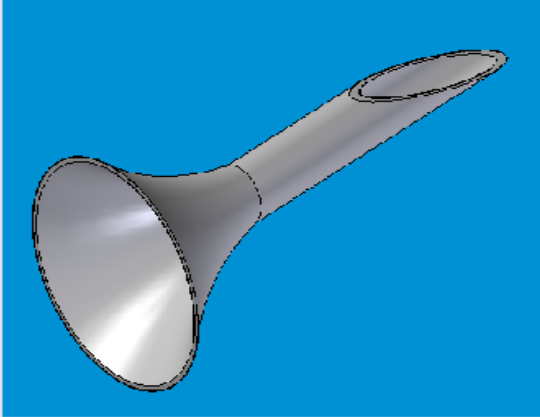
**DATOS DE ENTRADA**

Presion de entrada  
Po =  psi

Temperatura de entrada  
To =  F

Presion de salida  
Ps =  psi

Numero de divisiones para el calculo  
n =



**GRAFICAS A GENERAR**

- Grafica de la velocidad del fluido en funcion de la presion
- Grafica de volumen especifico del fluido en funcion de la presion
- Grafica de la relacion area sobre flujo masico de fluido en funcion de la presion
- Grafica de la relacion area sobre flujo masico de fluido en funcion del volumen especifico del fluido

**GENERAR GRAFICAS** **SALIR**

Figura 55. Plataforma del Programa en Mablal de la Tobera.

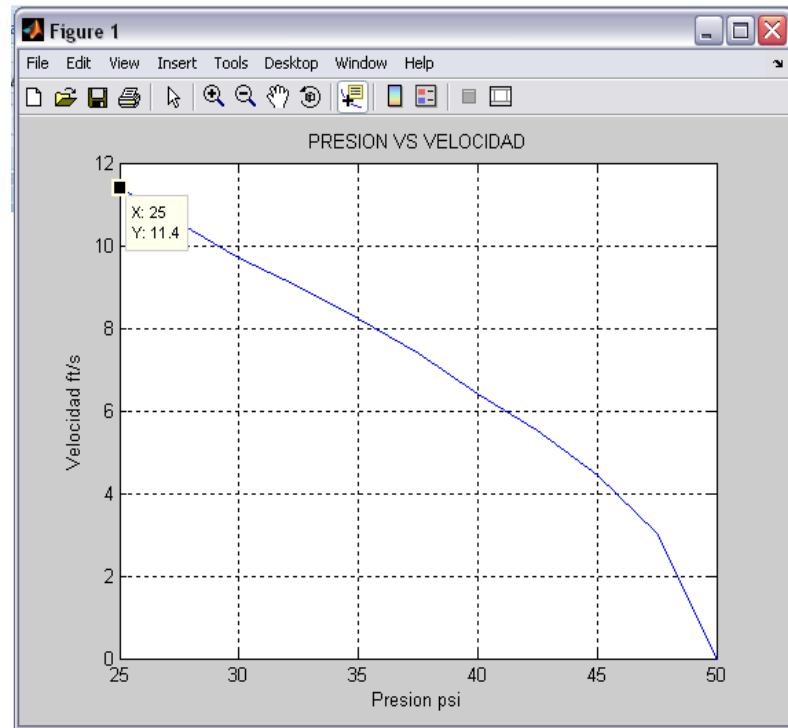


Figura 56. Gráfica de Matlab ( Presión vs Velocidad)

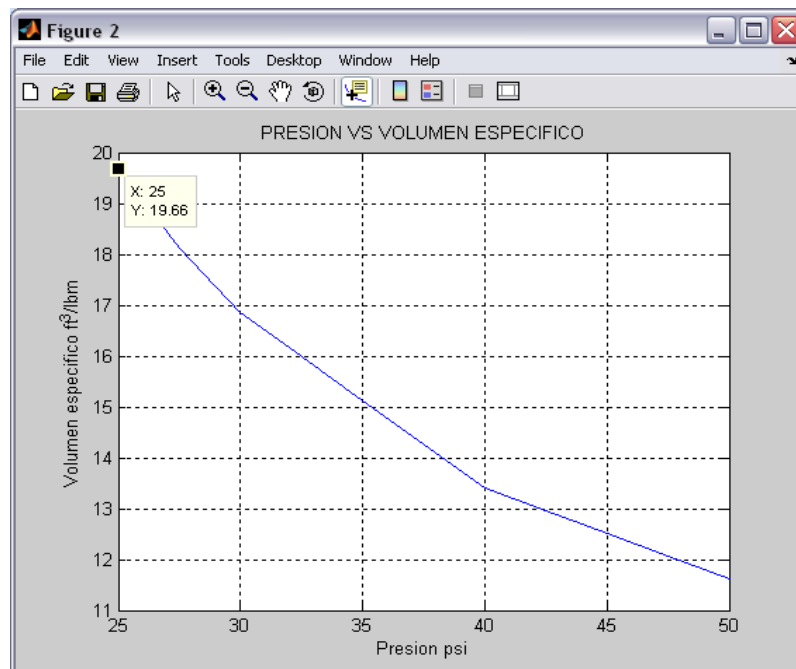


Figura 57. Gráfica de Matlab (Presión Vs Volumen específico)

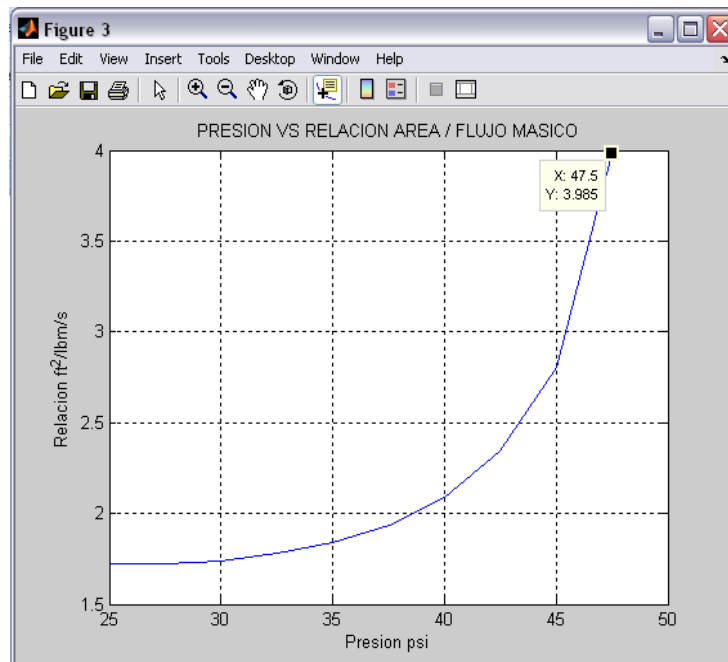


Figura 58. Gráfica de Matlab (Presión vs Relación Area/Flujo Másico).

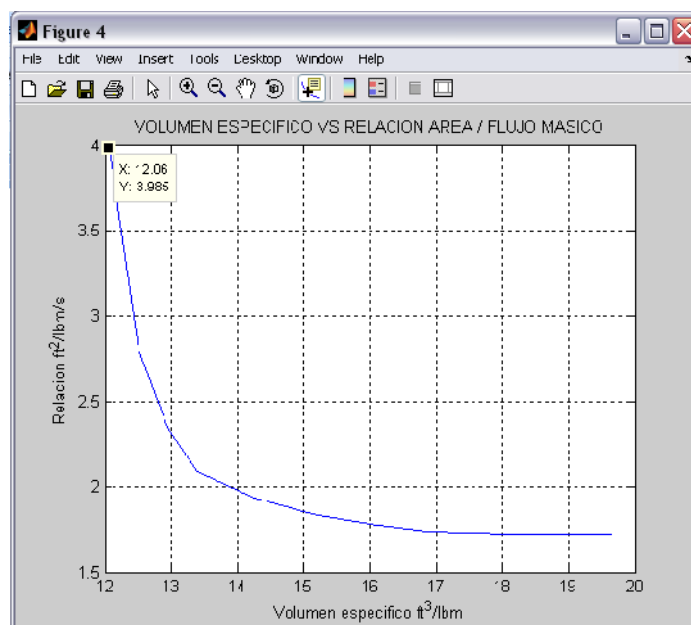
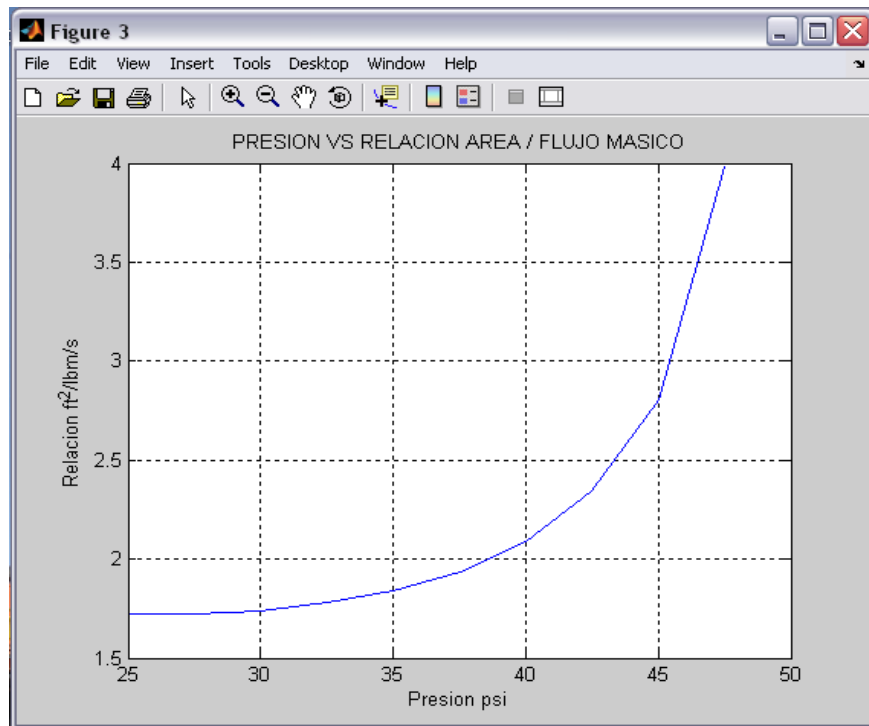


Figura 59. Gráfica de Matlab (Volumen Específico vs Relación Area/Flujo Másico)



**Figura 60. Gráfica. (Presión vs Relación Área / Flujo Másico)**



# ANEXO I. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.

| ACTIVIDADES                          | TIEMPO EN SEMANAS |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|--------------------------------------|-------------------|---|---|---|-----|---|---|---|-----|---|---|---|------------|-----|---|---|------|-----|---|---|---|-----|---|---|---|-----|---|---|--|
|                                      | 2008              |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   | Vacaciones |     |   |   | 2009 |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      | SEPT              |   |   |   | OCT |   |   |   | NOV |   |   |   | DIC        | ENE |   |   |      | FEB |   |   |   | MAR |   |   |   | ABR |   |   |  |
|                                      | 1                 | 2 | 3 | 4 | 1   | 2 | 3 | 4 | 1   | 2 | 3 | 4 | 1          | 2   | 3 | 4 | 1    | 2   | 3 | 4 | 1 | 2   | 3 | 4 | 1 | 2   | 3 | 4 |  |
| Documentacion Bibliografica          |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
| Revision de Conceptos Basicos        |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
| Estudio de Diseños de Toberas        |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
| Modelamiento Matemático              |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
| Simulacio en Ansys                   |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
| Comparacion de Resultados y Analisis |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
| Elaboración del Informe Final        |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |
|                                      |                   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |            |     |   |   |      |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |  |