

**APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA
SIMULACIÓN DE PROCESOS TERMOFLUIDICOS**

PABLO ANDRÉS SILVA ORTIZ

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ENERGÍA
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE
PROCESOS INDUSTRIALES
BUCARAMANGA
2005**

**APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA
SIMULACIÓN DE PROCESOS TERMOFLUIDICOS**

PABLO ANDRÉS SILVA ORTIZ

**Informe final de trabajo de grado como requisito para optar al título de
Ingeniero en Energía**

Director

Álvaro José Rey Amaya

Ingeniero Mecánico UIS

Magíster en Ingeniería Mecánica UNIANDES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA EN ENERGÍA

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE
PROCESOS INDUSTRIALES**

BUCARAMANGA

2005

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Bucaramanga, 22 de Diciembre de 2005

A Dios por darme la fe y fortaleza necesaria para no desfallecer y culminar esta etapa profesional.

A mis familiares por su comprensión, amor e incondicional apoyo.

Pablo A. Silva Ortiz

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Álvaro José Rey Amaya, director del trabajo de grado por su valiosa orientación, confianza y apoyo durante el desarrollo del mismo.

Al ingeniero Leonardo Antonio Fernández Polo evaluador del trabajo de grado por su apoyo y orientación en la ejecución del mismo.

A mis compañeros y a todas aquellas personas que me acompañaron durante todo este proceso.

A la Universidad Autónoma de Bucaramanga, en especial a la Facultad de Ingeniería en Energía, por proporcionar las herramientas y los recursos necesarios para la realización del trabajo de grado.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es proporcionar a la Facultad de Ingeniería en Energía de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, una herramienta interactiva enfocada a la simulación de procesos termofluidicos que pueda utilizarse como complemento a las asignaturas de Termodinámica, Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor correspondientes a la línea del conocimiento titulada Termofluidos.

La herramienta se diseñó a partir del desarrollo de módulos prácticos utilizando los programas de cómputo especializados ANSYS, HYSYS, CYCLEPAD y MATLAB, los cuales presentan componentes versátiles que permitieron abordar cada uno de los temas seleccionados en los módulos elaborados; por otra parte, se empleo el programa MACROMEDIA FLASH MX para elaborar los tutoriales de usuario y enlazar los resultados obtenidos.

El resultado del trabajo es una herramienta de fácil manejo que permite analizar, comparar y desarrollar procesos termofluidicos a través de los módulos propuestos. Estas características hacen la herramienta muy útil tanto para estudiantes y docentes, pues evita tediosos y largos procedimientos de cálculo, facilitando más tiempo para el análisis y comprensión de los problemas a analizar.

GLOSARIO

EDE: Ecuación de Estado, expresiones analíticas que permiten establecer relaciones entre las variables de presión, volumen y temperatura.

MTE: Modelos Termodinámicos de Exceso, expresiones para establecer la energía de Gibbs y los coeficientes de actividad en función de una expresión de concentración.

CAC: Coeficiente de Actividad de un Componente, representa relación de la actividad de un componente con respecto a su fracción molar.

CFUG: Coeficiente de Fugacidad, expresión para establecer la relación de fugacidad con respecto a la composición y a la presión.

FAL: Fracción de Área Local, concepto que permite establecer microscópicamente una mezcla líquida.

CIB: Coeficiente de Interacción Binaria, representa la atracción molecular entre los componentes livianos y pesados de una mezcla.

CDF: Coeficiente de Funcionamiento de un sistema de refrigeración.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE SIMULACIÓN	18
1.1 MODELACIÓN DE PROCESOS	19
1.1.1 Leyes Fundamentales	19
1.2 APLICACIONES DE LA SIMULACIÓN	20
2. MODELADOS DE SIMULACIÓN	21
2.1 MODELO MODULAR SECUENCIAL	22
2.2 MODELO DE ECUACIONES	23
3. PROCESOS TERMODINÁMICOS	25
3.1 MODELO DE ESTADO DE PENG & ROBINSON	25
3.1.1 Expresión para Sustancias Puras	26
3.2 CAPACIDAD PREDICTIVA	28
3.1 CICLOS TERMODINÁMICOS	31
3.3.1 CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADOS	31
3.3.2 CICLOS DE POTENCIA A GAS	40
3.3.3 CICLOS DE REFRIGERACIÓN	47
4. PROCESOS DE MÉCANICA DE FLUIDOS	53
4.1 MEDICIÓN DE FLUJO	53
4.4.1 Medidores de Presión Diferencial	53
4.1.2 Medidor de Orificio	57

4.1.3 Medidor Vénturi	59
4.1.4 Tobera de Flujo	60
5. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	62
5.1 CONDICIONES DE FRONTERA	62
5.2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS	64
5.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR	68
6. DISEÑO METODOLÓGICO	73
6.1 REVISIÓN DE CONTENIDOS	73
6.2 DETERMINACIÓN DE LOS PROGRAMAS	73
6.3 DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS UTILIZADOS	73
6.3.1 Matlab	73
6.3.2 Ansys	74
6.3.3 Hysys	75
6.3.4 Cyclepad	76
6.4 DISEÑO DE LAS PRÁCTICAS	76
6.5 IMPLEMENTACIÓN	76
6.6 PRUEBAS PILOTO	76
6.7 RETROALIMENTACIÓN	77
6.8 ELABORACIÓN MANUAL INTERACTIVO DE USUARIO	77
7. PRÁCTICAS PROPUESTAS	78
7.1 MÓDULO I - CICLOS DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	79
7.2 MÓDULO II - CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADOS	83
7.3 MÓDULO III – CICLOS DE POTENCIA DE GAS	86
7.4 MÓDULO IV – MEDICIÓN DE FLUJO	89
7.5 MÓDULO V – CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO ESTABLE	93
7.6 MÓDULO VI - ALETAS	97

7.7 MÓDULO VII – INTERCAMBIADOR DE CALOR	100
7.8 MÓDULO VIII – ESTADO TRANSITORIO	103
CONCLUSIONES	106
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	108
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	111

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Condiciones de Frontera	63
Tabla 2. Configuraciones de Aletas	67
Tabla 3. Cubiertas de Intercambiadores de Calor Compactos	72
Tabla 4. Resultados Obtenidos en Cada Estado	82
Tabla 5. Resultados Obtenidos en los Equipos	82
Tabla 6. Resultados de las Propiedades del Ciclo de Refrigeración	82
Tabla 7. Resultados Obtenidos en Cada Estado	84
Tabla 8. Resultados Obtenidos en los Equipos	85
Tabla 9. Resultados de las Propiedades del Ciclo de Vapor	85
Tabla 10. Resultados Obtenidos en Cada Estado	87
Tabla 11. Resultados Obtenidos en los Equipos	87
Tabla 12. Resultados de las Propiedades del Ciclo de Gas	88
Tabla 13. Resultados de los Instrumentos de Medición	90
Tabla 14. Resultados Obtenidos en el Módulo IV	92
Tabla 15. Propiedades de los Materiales Malos Conductores	98
Tabla 16. Propiedades de los Materiales Buenos Conductores	99
Tabla 17. Propiedades del Intercambiador de Calor	102
Tabla 18. Propiedades Termofísicas de Materiales Comunes	104
Tabla 19. Resultados Obtenidos en el Módulo VIII	105
Tabla 20. Componentes	122
Tabla 21. Condiciones de Operación de las Corrientes	123
Tabla 22. Resultados Obtenidos	126
Tabla 23. Resultados Encuestas	128

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Selección de un Modelo Termodinámico I	29
Figura 2. Selección de un Modelo Termodinámico II	30
Figura 3. Ciclo Rankine Ideal Simple	32
Figura 4. Diagrama T - S. Ciclo Rankine	33
Figura 5. Ciclo Rankine Ideal con Recalentamiento	35
Figura 6. Ciclo Rankine Ideal Regenerativo	36
Figura 7. Ciclo Combinado	39
Figura 8. Ciclo Otto	40
Figura 9. Diagrama T – S, Ciclo Otto	41
Figura 10. Ciclo Diesel	43
Figura 11. Diagrama T- S, Ciclo Diesel	44
Figura 12. Ciclo Brayton Ideal	45
Figura 13. Diagrama T- S Ciclo Brayton Ideal	46
Figura 14. Ciclo Ideal de Refrigeración por Compresión de Gas	48
Figura 15. Sistema de Refrigeración en Cascada de 2 Etapas	50
Figura 16. Sistema de Refrigeración por Compresión	52
Figura 17. Flujo a Través de un Medidor de Orificio	54
Figura 18. Detalles de un Medidor de Orificio de Placa Delgada	57
Figura 19. Coeficiente de Flujo K Contra Número de Reynolds	58
Figura 20. Medidor Vénturi	60
Figura 21. Tobera de Flujo	61
Figura 22. Conducción y Convección Combinadas	64
Figura 23. Uso de Aletas para Aumentar la Transferencia de Calor	65
Figura 24. Esquema de Intercambiadores de Tubos con Aletas	66
Figura 25. Configuraciones de Aletas	67

Figura 26. Intercambiadores de Calor de Tubos Concéntricos	68
Figura 27. Intercambiadores de Calor de Flujo Cruzado	69
Figura 28. Intercambiadores de Calor de Tubos y Coraza de un Paso	70
Figura 29. Intercambiadores de Calor de Tubos y Coraza	70
Figura 30. Cubiertas de Intercambiadores de Calor Compactos	71
Figura 31. Interfase Cyclepad	80
Figura 32. Selección e Implementación de los Elementos	80
Figura 33. Interfase Gráfica del Modo de Análisis	81
Figura 34. Dimensiones Establecidas en los Instrumentos de Medición	90
Figura 35. Generalidades del Programa ANSYS	91
Figura 36. Finalización de la Simulación	92
Figura 37. Descripción del Problema de Conducción	93
Figura 38. Interfase del Programa MATLAB	94
Figura 39. Herramienta PDE Toolbox	94
Figura 40. Diagrama Malla de Superficie	95
Figura 41. Selección de las Condiciones de Frontera	95
Figura 42. Interfase del Perfil de Temperatura	96
Figura 43. Descripción del Problema de Aletas	97
Figura 44. Selección del Intercambiador de Calor	101
Figura 45. Caracterización del Intercambiador de Calor	101
Figura 46. Diagrama de Temperatura v.s Flujo de Calor	102
Figura 47. Descripción del Problema de Estado Transitorio	103
Figura 48. Generalidades del Programa HYSYS	111
Figura 49. Determinación del Modelo Termodinámico	112
Figura 50. Selección de los Componentes	113
Figura 51. Interfase PFD	113
Figura 52. Línea de Comando	116
Figura 53. Interfase CYCLEPAD	118
Figura 54. Modo de Construcción	118
Figura 55. Modo de Análisis	119

Figura 56. Resultados CYCLEPAD	120
Figura 57. Generalidades HYSYS	121
Figura 58. Ambiente de Simulación	122
Figura 59. Interfase Gráfica Workbook	123
Figura 60. Tipos de Corrientes	124
Figura 61. Paleta de Herramientas	124
Figura 62. Análisis Gráfico de Estados	125
Figura 63. Determinación de las Corrientes en el Mezclador	125
Figura 64. Presentación de Resultados	126
Figura 65. Resultados Encuestas	129

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Manual de usuario HYSYS	111
Anexo B. Manual de usuario ANSYS	114
Anexo C. Manual de usuario CYCLEPAD	117
Anexo D. Aplicaciones	121
Anexo E. Formato de Evaluación	127

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo e implementación de aplicaciones computacionales en el campo de la ingeniería, ha originado un cambio total en nuestra visión futurista. Antiguamente, el estudiante o docente dedicaba gran parte de su tiempo al proceso de cálculos dispendiosos y repetitivos con el fin de solucionar un problema. Actualmente, esto ha cambiado gracias al uso masivo de los computadores y de los programas de cómputo especializados, los cuales permiten modelar un sinnúmero de problemas, reduciendo al mínimo el tiempo de ejecución de los cálculos y permitiendo el análisis de diversas situaciones, con sólo modificar cualquiera de las variables que intervienen en el mismo.

En la facultad de Ingeniería en Energía, muchas asignaturas de la línea del conocimiento de Termofluidos se están beneficiando con la introducción de programas de cómputo versátiles, que le permiten al estudiante y al docente familiarizarse con el uso de las herramientas computacionales y al mismo tiempo aplicarlas a la solución de problemas de ingeniería.

Por las razones anteriores, se desarrolla el presente trabajo de grado, titulado “Aplicación de Herramientas Computacionales para la Simulación de Procesos Termofluidicos”, Esta herramienta permite el modelamiento de problemas de cada uno de los temas complementarios en las asignatura seleccionadas, lo cual hace que sea una opción muy útil para estudiantes y docentes, que requieran una solución rápida y de fácil interpretación.

Los capítulos 1 y 2 tienen como fin presentar los conceptos básicos presentes en la simulación de procesos, modelos y leyes fundamentales.

En los capítulos 3, 4 y 5 se presentan los conceptos fundamentales de la teoría en torno a las temáticas de los cursos seleccionados, Termodinámica, Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor, los cuales constituyen la estructura básica de la línea termofluidos.

En el capítulo 6, se presentan las características del diseño metodológico implementado en el desarrollo de los módulos y una breve descripción de cada uno de los programas de cómputo empleados.

El capítulo 7, ilustra las prácticas propuestas a través de las etapas metodológicas diseñadas en torno a las temáticas seleccionadas: Conducción de Calor en Estado Estable, Aletas, Intercambiadores, Conducción de Calor en Estado Estable, Ciclos Termodinámicos y Medición de Flujo.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en los formatos de evaluación de las herramientas de cómputo implementadas.

Se incluyen como anexos a este documento, el Manual del Usuario de los programas de cómputo ANSYS, CYCLEPAD, HYSYS. Además, se presentan algunas aplicaciones industriales.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE SIMULACIÓN

La simulación de un proceso industrial empieza por el desarrollo de un programa capaz de repetir las características de comportamiento de dicho proceso ante las variaciones de sus variables. Como es imposible repetir exactamente dichas características, necesariamente deben aproximarse las mismas para que la simulación sea lo más real posible. De aquí la dificultad en dicha aproximación y los esfuerzos en inventiva y en horas de dedicación de personas expertas en el campo multidisciplinario que representa globalmente el proceso, por ejemplo, de conocimiento de las características de los productos de acuerdo con las condiciones de servicio, leyes que gobiernan la simulación de los equipos utilizados en la industria, relaciones entre los diversos circuitos del proceso marcados por el diagrama de flujo y representados en el diagrama de bloques, etc.¹

La simulación de procesos puede plantearse de tres formas distintas:

- a. El desarrollo de un programa específico de un proceso en el que las variables están determinadas de antemano, o bien en el que el programa pregunta sus valores antes de cada ejecución.

El programa es flexible pero esto requiere un gran tiempo de desarrollo, siendo sólo apto para el proceso en particular de que se trate, es decir, no puede crecer ni aplicarse a otros procesos, aunque sean similares, y cada nueva simulación requerirá un tiempo de desarrollo comparable.

- b. El desarrollo de un conjunto de subprogramas organizados en bloques que unidos entre sí representan el proceso completo.

¹ CREUS, Antonio. Simulación y Control de Procesos en PC. Segunda Edición. Barcelona : Marcombo & Boixareu Editores, 1998. p 20 – 22.

En este caso, el usuario dispone de una biblioteca de subprogramas que le permiten simular las unidades individuales de su proceso. Por ejemplo, puede combinar fácilmente una unidad de control de presión con una unidad de intercambio de calor para simular el calentamiento de un producto con vapor de agua cuya presión está controlada mediante un controlador de presión.

Por otro lado, también puede seleccionar los datos de propiedades termodinámicas de los productos y el método de convergencia de cálculo más rápido que conlleve a una solución aceptable.

- c. Los programas ejecutivos, que son programas de carácter general que simulan una clase particular de procesos y seleccionan la técnica numérica más adecuada para la resolución rápida de las ecuaciones de la simulación. Este programa presenta para el usuario la ventaja de que la solución es más sencilla pero queda restringido al proceso para el que fue diseñado.

1.1 MODELACIÓN DE PROCESOS

La modelación de procesos requiere el desarrollo de un modelo matemático de un sistema de ingeniería, con las simplificaciones adecuadas para simular realmente el núcleo del proceso. Estas simplificaciones deben ser lo más leves posibles, dentro de las limitaciones que puedan imponer las herramientas informáticas empleadas, para que la simulación sea lo mejor posible y los resultados obtenidos generen seguridad y confianza en el usuario.

1.1.1 Leyes Fundamentales. Las leyes fundamentales que gobiernan el proceso son las siguientes:

- ✓ **Balance de Masa.** Según el principio de conservación de masas, el caudal masa que entra en el sistema menos el caudal masa que sale del sistema es igual a la velocidad de cambio de masa dentro del sistema.

Otras ecuaciones utilizadas son las transferencias de energía, masa y momento, o ecuaciones de transporte de fluidos; las ecuaciones de estado que indican la forma en que varían las propiedades físicas de los productos con las variaciones en temperatura, presión y composición; las ecuaciones de equilibrio según a la segunda Ley de la Termodinámica y las ecuaciones de velocidad de reacción en las reacciones químicas.

- ✓ **Métodos de Convergencia.** Los métodos de convergencia presentan modelos iterativos de prueba y error basados en la suposición de una solución y de un ensayo para ver si el sistema seleccionado la cumple. En caso de que no sea así, los ensayos de prueba y error entregan otra solución, y así sucesivamente hasta encontrar una aproximación suficiente a la solución real, siempre que, el método iterativo converja.

1.2 APLICACIONES DE LA SIMULACIÓN

La utilidad que presentan los simuladores permite a los ingenieros realizar:

1. Estudios de viabilidad de los procesos.
2. Balances de materia y energía en los diagramas de flujo de los procesos para el dimensionamiento de los equipos.
3. El estudio de los efectos que pueden producir cambios en las variables de entrada del proceso cuando se quiera y las veces que se requiera, con notable economía con relación a las mismas pruebas del proceso real, en el cual posiblemente no podrían efectuarse.
4. La optimización del proceso como opción dentro de la simulación, con las ventajas derivadas de ahorro de energía, aumento de la eficiencia e identificación de los problemas de reparto de flujos.

2. MODELADOS DE SIMULACIÓN

Para simular un proceso es necesario crear un modelo que permita estudiar y prever el comportamiento que tendrá, a fin de poder evaluarlo ante determinadas condiciones de servicio y preparar de este modo los cambios y las estrategias a seguir. La ventaja que tiene este procedimiento en particular frente a una planta piloto, es la rapidez de obtención de los datos experimentales y la economía de la simulación. Además, el modelo debe cumplir las características de precisión necesarias para obtener resultados que sean lo más concordantes posible con la práctica².

La utilidad del modelo en la simulación reside principalmente en el diseño de una nueva planta y el análisis de plantas en operación.

Para determinar la viabilidad de la planta es necesario:

1. Dimensionar los equipos de la planta y los materiales a emplear para estimar su costo, y, de esta manera establecer el capital necesario para realizar la inversión. Debe disponerse de suficientes datos de la planta y del proceso, que permitan realizar el balance de materia y de energía en estado estacionario y el control del proceso.
2. Información de los costos de materias primas, personal y mantenimiento. Estos valores pueden extraerse de la propia experiencia de la compañía o de bases de datos. También es posible determinar los cambios que va a sufrir el sistema si se modifican las condiciones de operación del proceso o de la planta, o bien si se cambian las condiciones de proyecto de la planta.

² CREUS, Antonio. Simulación y Control de Procesos en PC. Segunda Edición. Barcelona : Marcombo & Boixareu Editores, 1998. p. 51 – 70.

La modernización de proyectos existentes también se presta a la simulación. El ensayo con el modelo permite estudios sobre la conservación de la energía, así como sobre el aumento de capacidad de la planta y la identificación de los lugares críticos para la conservación del flujo de productos en la misma.

El modelo de la planta también se presta al ensayo de varias configuraciones de control que permitan optimizar el control de la planta, incluyendo en este elemento el ahorro de energía, la mejora de los rendimientos de fabricación y la conexión de los equipos con sistemas de control avanzado de la planta.

A continuación se enumeran los modelos de simulación más utilizados en la industria son los siguientes:

2.1 MODELO MODULAR SECUENCIAL

El sistema de simulación modular corresponde a la división de los procesos químicos en unidades de transformación, donde se realizan los cambios físicos o químicos de las materias (reactores, secaderos, mezcladores, intercambiadores de calor, evaporadores, columnas de destilación y unidades de transporte) donde una red de tuberías conecta los diversos equipos entre sí para que las materias y las intermedias circulen por la planta, así como los fluidos de energía.

Este sistema de módulos consta de modelos individuales de operación de la planta, que partiendo de datos tales como los flujos de entrada de los fluidos y los parámetros de dimensionamiento del modulo, proporcionan los flujos de salida y los resultados del modulo. Las variables independientes consisten generalmente en caudales, temperaturas y presiones. Las variables dependientes son generalmente caudales totales, fracción de vapor y entalpía total o temperatura.

Cada módulo representa un determinado proceso de operación unitaria realizada en la planta, y consiste en un subprograma cuyo objeto es calcular los flujos o corrientes de salida partiendo de los flujos o corrientes de entrada con los parámetros del módulo conocidos e introducidos en el programa. La resolución de la arquitectura modular secuencial se lleva a cabo mediante los métodos de cálculo de lazos de recirculación.

De este modo, el sistema conduce a una resolución secuencial de operaciones individuales en cada módulo. Primero deben construirse los módulos de operación de la planta, para después iniciar el cálculo con la entrada de materias primas y de los flujos de energía en el primer módulo, y continuar con los cálculos módulo a módulo hasta llegar al último, donde ya se obtienen los productos finales.

2.2 MODELO DE ECUACIONES

Las ecuaciones diferenciales que representan el estado de los lazos del diagrama de flujo del proceso presentan un difícil problema de solución. Se está realizando un esfuerzo considerable para resolverlas simultáneamente. Este acercamiento a la solución del diagrama de flujo se denomina de ecuaciones orientadas, y conduce generalmente a ecuaciones no lineales del tipo:

$$F(X, U) = 0 \quad (1)$$

donde

X = Vector de las variables de estado dependientes.

U = Vector de las variables de decisión independientes.

Las variables de estado incluyen todas las variables del flujo de los productos finales e intermedios, las variables internas y las variables resultado. Las variables de decisión incluyen normalmente los parámetros de los bloques y las variables del flujo de entrada.

Si estas ecuaciones de estado se han linealizado, se les puede aplicar alguno de los métodos de convergencia de ecuaciones lineales, por ejemplo, el método Newton³, que tras una iteración general adquiere una forma de algoritmo de convergencia.

$$X_{n+1} = X_n - f'(X_n) / f''(X_n) \quad (2)$$

Si las ecuaciones no se han linealizado o no se desean linealizar por la falta de precisión relativa que ello conlleva, se emplean métodos de aceleración de convergencia. Este método de ecuaciones se ha utilizado ampliamente en la modelización de unidades individuales por sus ventajas de rápida convergencia en la solución, tales como columnas de destilación. Sin embargo, la desventaja que presenta es la dificultad para diagnosticar por parte del usuario casos en los cuales se origine un error de convergencia de la solución.

³ CREUS, Antonio. Simulación y Control de Procesos en PC. Segunda Edición. Barcelona : Marcombo & Boixareu Editores, 1998. p. 90 – 98.

3. PROCESOS TERMODINÁMICOS

A continuación, se presenta la fundamentación teórica en torno a los procesos termodinámicos presentes en los modelos implementados a partir de la herramienta computacional desarrollada. Además, se describe el modelo termodinámico más utilizado en el programa de cómputo HYSYS, titulado Peng & Robinson, para desarrollar simulaciones y aplicaciones con base en las ecuaciones de estado.

3.1 MODELO DE ESTADO DE PENG & ROBINSON

Las ecuaciones de estado EDE, son expresiones analíticas que permiten establecer las relaciones entre las variables presión, volumen y temperatura. Por esta razón han sido utilizadas para reproducir el equilibrio líquido – vapor y el comportamiento volumétrico tanto de sustancias puras como de mezclas. Una de las ecuaciones estado más utilizada en la industria es la ECE de Peng-Robinson.

Esta ecuación fue presentada en el año 1976 según trabajo desarrollado por Ding-Yu Peng y Donald B. Robinson, está basada en la forma general propuesta por Van Der Waals para ecuaciones cúbicas de estado biparamétricas. Dichos parámetros son involucrados en la ecuación para representar más acertadamente el comportamiento real de los gases teniendo en cuenta tanto el efecto de atracción entre moléculas (parámetro a), como su tamaño (parámetro b) que toman importancia a bajas y altas presiones respectivamente⁴.

⁴ Apuntes y Desarrollos del Curso Electivo en Simulación y Optimización Industriales. Facultad de Ingeniería en Energía - UNAB. Primer Semestre de 2005.

3.1.1 Expresión para Sustancias Puras. Las ecuaciones de estado expresan tradicionalmente la presión como la suma de dos términos, que representan la repulsión y la atracción entre las moléculas:

$$P = P_r + P_a \quad (3)$$

En el caso de la EDE de Peng & Robinson la expresión es:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (4)$$

Esta ecuación en términos del factor de compresibilidad Z, toma la forma de un polinomio cúbico:

$$Z^3 - (1 - B) \cdot Z^2 + (A - 3B^2 - 2B) \cdot Z - (AB - B^2 - B^3) \quad (5)$$

donde,

$$A = \frac{a(T) \cdot P}{R^2 T^2} \quad (6)$$

$$B = \frac{bP}{RT} \quad (7)$$

$$Z = \frac{Pv}{RT} \quad (8)$$

Al aplicar la ecuación en el punto crítico se obtiene las expresiones para los parámetros a (Tc), b (Tc) y Zc

$$a(T_c) = \Omega_a \frac{R^2 T_c^2}{P_c^2} \quad (9)$$

$$b(T_c) = \Omega_b \frac{RT_c}{P_c} \quad (10)$$

$$Z_c = 0.307 \quad (11)$$

Los valores correspondientes a las constantes Ω_a y Ω_b son:

$$\Omega_a = 0.45724 \quad (12)$$

$$\Omega_b = 0.07780 \quad (13)$$

A temperaturas distintas a la crítica las expresiones utilizadas son:

$$a(T) = a(T_c) \cdot \alpha(T_r, \omega) \quad (14)$$

$$b(T) = b(T_c) \quad (15)$$

La función $\alpha(T_r, \omega)$ es adimensional e igual a uno a la temperatura crítica. Su expresión se obtuvo a partir de los valores que satisfacen al mismo tiempo la *ecuación 5* (cúbica de Z), y la condición termodinámica de equilibrio, (fugacidad del líquido igual a la fugacidad del vapor), reproduciendo los valores de presiones de vapor reportados a varias temperaturas en la literatura. Para todas las sustancias analizadas se observó una relación entre α y T_r que puede ser linealizada de la siguiente forma:

$$\alpha^{1/2}(T_r, \omega) = 1 + m(1 - T_r^{1/2}) \quad (16)$$

Siendo m una constante propia de cada sustancia pura correlacionada con el factor de acéntrico:

$$m = 0.37464 + 154226 \omega - 0.26992 \omega^2 \quad (17)$$

La expresión para fugacidad de una sustancia pura, utilizando la EDE de Peng – Robinson es:

$$\ln \frac{f}{P} = Z - 1 - \ln(Z - B) - \frac{A}{2\sqrt{2}} \ln \left[\frac{Z + 2.414B}{Z - 0.414B} \right] \quad (18)$$

3.2 CAPACIDAD PREDICTIVA

Numerosos autores han trabajado con la EDE de Peng & Robinson para representar una forma sencilla de aplicación que proporciona muy buenos resultados, especialmente en el cálculo de propiedades para la fase gaseosa.

Sin embargo, se ha determinado también que la EDE en su forma original no representa buenos resultados al predecir las propiedades de la fase líquida, tales como la densidad a la presión de saturación, la gravedad específica, la relación gas – aceite o el factor volumétrico B_0 .

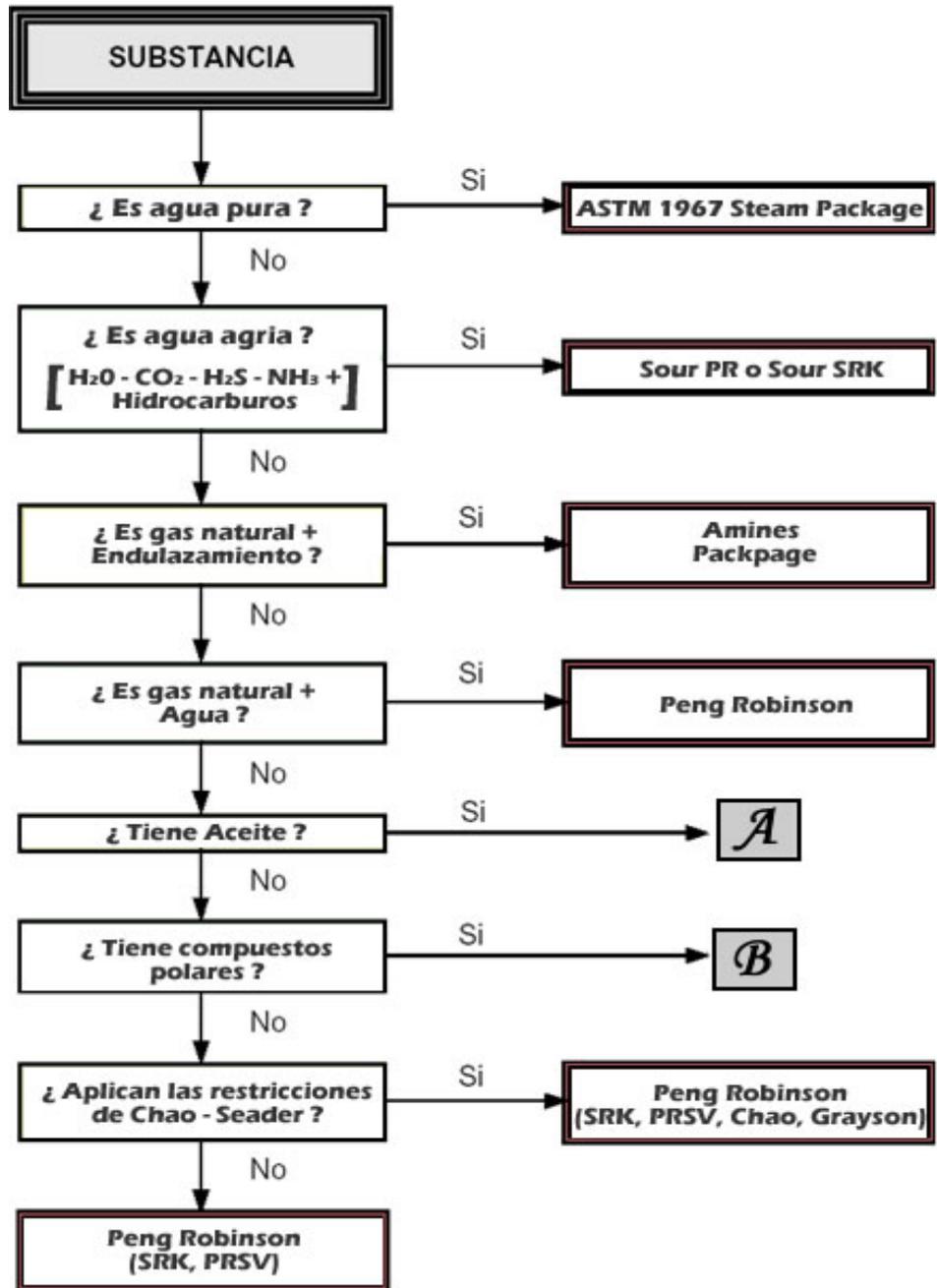
En sistemas de gas y condensado, en especial cerca al punto crítico, las predicciones frecuentemente llevan a encontrar un punto de burbuja en vez de un punto de rocío, o predicen mayor porcentaje del líquido condensado que el real.

Estas deficiencias pueden ser disminuidas aplicando diferentes técnicas como:

- Caracterización de los fluidos
- Aplicación de coeficientes de interacción binaria CIB
- Traslación de volumen
- Procedimientos de regresión múltiple de parámetros

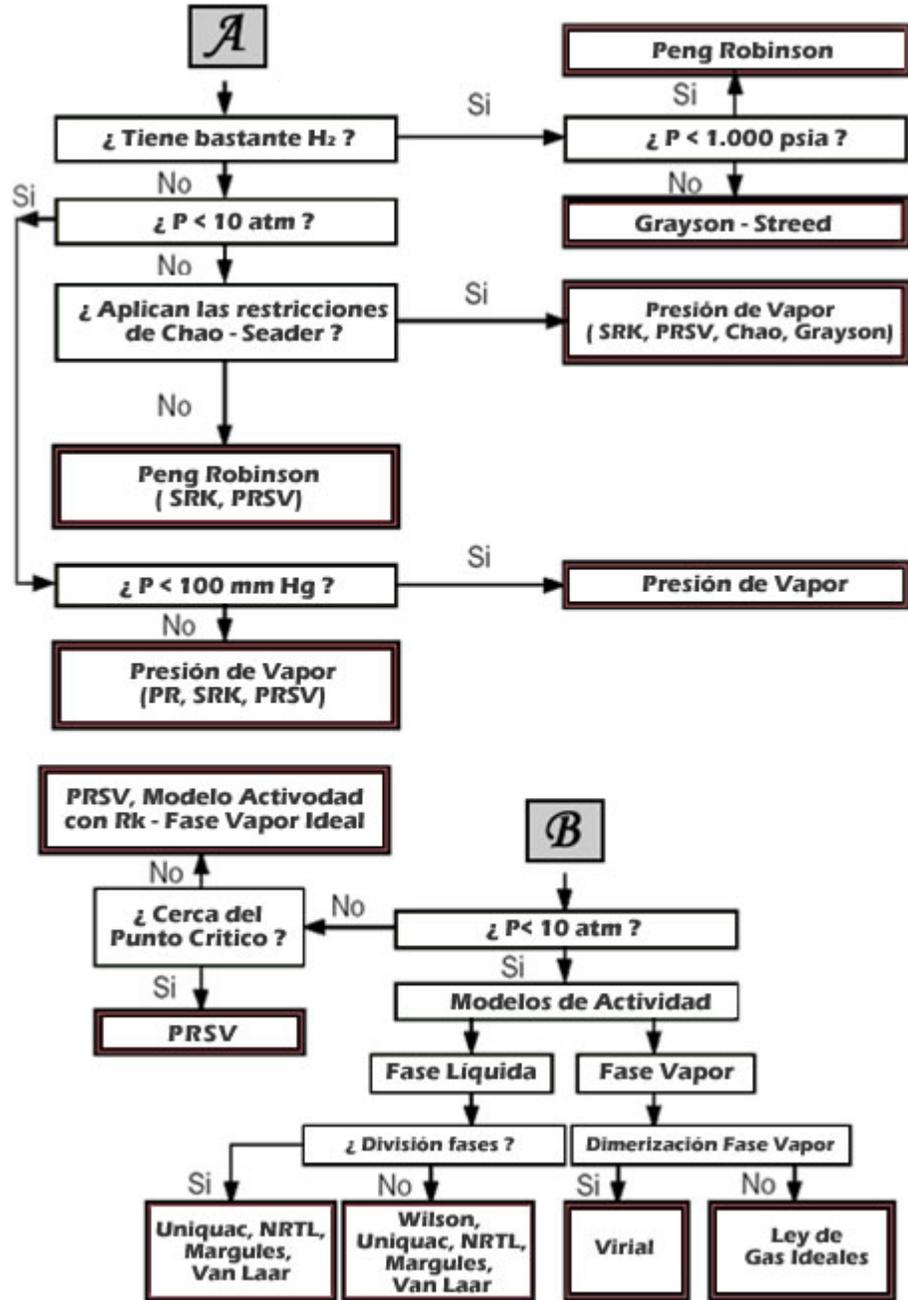
A continuación se presentan en las Figuras 1 y 2 los diagramas de flujo entorno a la selección de los paquetes de termodinámicos de simulación aplicado al programa HYSYS.

Figura 1. Selección de un Modelo Termodinámico I



Fuente: Apuntes y Desarrollos del Curso Electivo en Simulación y Optimización Industriales. Facultad de Ingeniería en Energía - UNAB. Primer semestre de 2005.

Figura 2. Selección de un Modelo Termodinámico II



Fuente: Apuntes y Desarrollos del Curso Electivo en Simulación y Optimización Industriales. Facultad de Ingeniería en Energía - UNAB. Primer Semestre de 2005.

3.1 CICLOS TERMODINÁMICOS

En Termodinámica hay dos diferentes áreas de aplicación, la generación de potencia y la refrigeración. Ambas se realizan mediante sistemas que operan en un ciclo termodinámico. Éstos se dividen en dos categorías generales: Ciclos de Potencia y los Ciclos de Refrigeración⁵.

Los dispositivos o sistemas empleados en producir una salida de potencia neta reciben el nombre de máquinas, y los ciclos termodinámicos que operan se denominan ciclos de potencia. Los dispositivos o sistemas utilizados para producir refrigeración se llaman refrigeradores, acondicionadores de aire o bombas de calor, y los ciclos que operan reciben el nombre de ciclos de refrigeración.

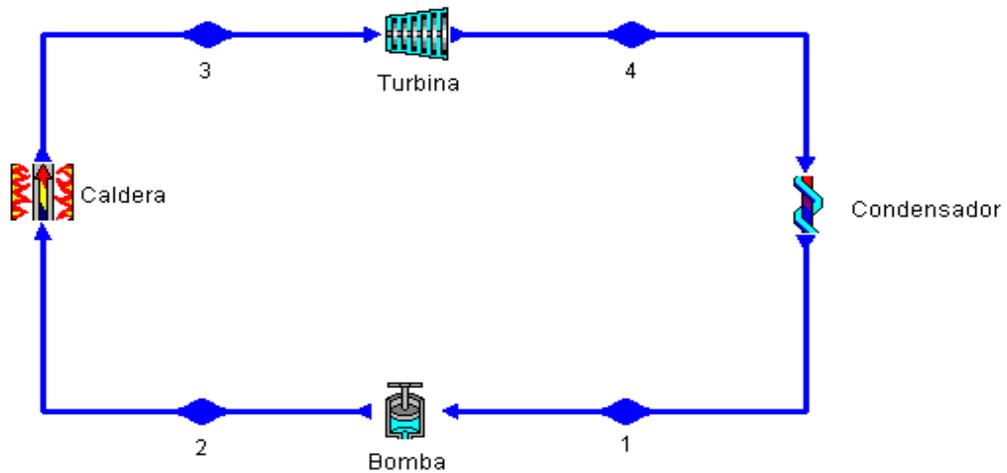
El ciclo de refrigeración más empleado con más frecuencia es el ciclo de refrigeración de compresión de vapor, donde el refrigerante se evapora y condensa alternadamente, y se comprime en la fase de vapor.

3.3.1 CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADOS. Se tienen:

- ✓ **El Ciclo Rankine Ideal Simple.** Es posible eliminar muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot si el vapor es sobrecalentado en la caldera y se condensa por completo en el condensador. El ciclo que resulta es el ciclo Rankine, ilustrado en las Figuras 3 y 4 obtenidas a partir del desarrollo del módulo de ciclos termodinámicos a través del programa CYCLEPAD.

⁵ ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Tomo II. Segunda Edición. México : McGrawHill, 1994. p. 449.

Figura 3. Ciclo Rankine Ideal Simple



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

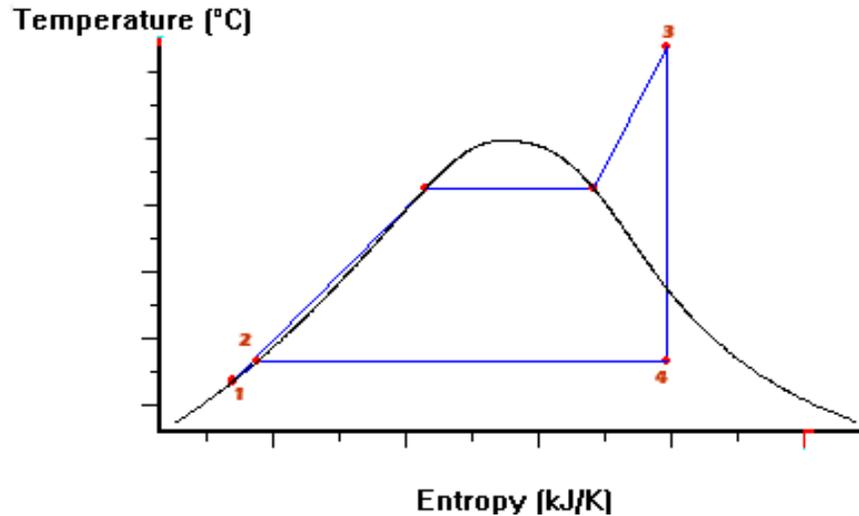
El ciclo Rankine ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto por los siguientes cuatro procesos:

- 1 – 2** Compresión isoentrópica en una bomba
- 2 – 3** Adición de calor a presión constante en una caldera
- 3 – 4** Expansión isoentrópica en una turbina
- 4 – 1** Rechazo de calor a presión constante en un condensador

El agua entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se le aplica una compresión isoentrópica hasta la presión de operación de la caldera. La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso de compresión isoentrópica debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua.

El agua entra a la caldera como líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera es un gran intercambiador de calor, donde el calor se origina en los gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes y se transfiere al agua a presión constante.

Figura 4. Diagrama T - S. Ciclo Rankine



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

La caldera, es la sección donde el vapor se sobrecalienta (el sobrecalentador), recibe el nombre de generador de vapor. El vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la turbina donde se expande isoentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores en el estado 4, donde el vapor entra al condensador.

En este estado, el vapor suele ser una mezcla saturada líquido – vapor con una calidad alta. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, que rechaza calor hacia un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmósfera. El vapor abandona el condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando el ciclo.

- ✓ **El Ciclo Rankine Ideal Con Recalentamiento.** Es posible aprovechar las mayores eficiencias a presiones más altas de la caldera sin aumentar el nivel de humedad excesiva en las etapas finales de la turbina de la siguiente manera:

1. Sobrecalentar el vapor a temperaturas muy altas antes de que ingrese a la turbina. Solución deseable, porque la temperatura promedio a la que se añade el calor también se incrementaría, lo que aumentaría la eficiencia del ciclo. Sin embargo, no es una solución viable pues requerirá elevar la temperatura del vapor hasta niveles metalúrgicamente inseguros.
2. Expandir el vapor en la turbina en dos etapas y recalentarlo entre ellas. Es decir, modificar el ciclo Rankine ideal simple con el proceso de recalentamiento. El recalentamiento es una solución práctica al problema de humedad excesiva en turbinas y con frecuencia se recurre a él en las modernas plantas de energía a vapor.

El ciclo Rankine ideal con recalentamiento difiere del ciclo Rankine ideal simple en que el proceso de expansión sucede en dos etapas. En la primera etapa (turbina de alta presión), el vapor se expande isoentrópicamente hasta una presión intermedia y se regresa a la caldera donde se recalienta a presión constante, lo más común es que sea hasta la temperatura de entrada de la primera etapa de la turbina.

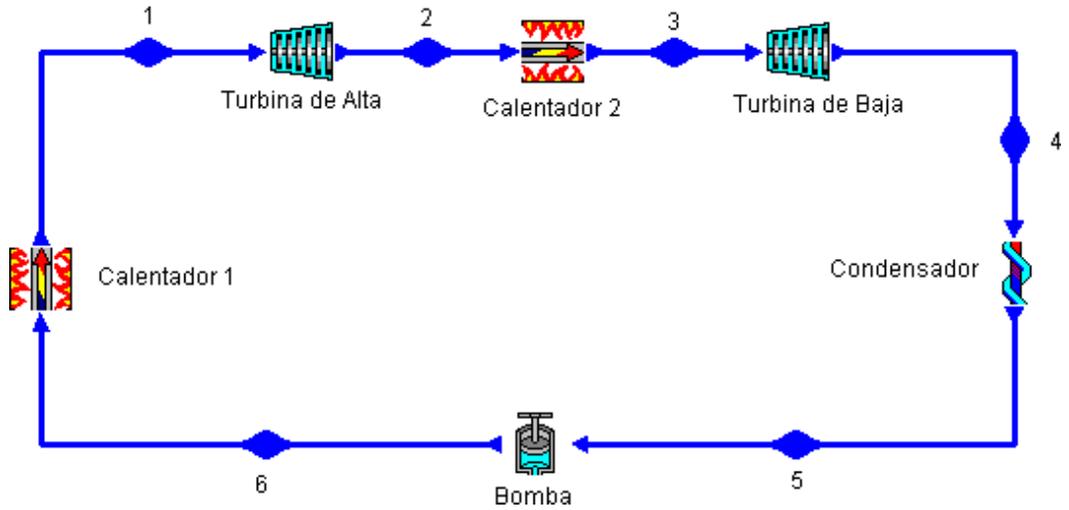
Después, el vapor se expande isoentrópicamente en la segunda etapa (turbina de baja de presión) hasta la presión del condensador. De modo que la entrada de calor total y la salida total de trabajo de la turbina en un ciclo de recalentamiento viene a ser

$$q_{gen} = q_{primario} + q_{recalentamiento} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad (19)$$

y

$$W_{turb, sal} = W_{turb,1} + W_{turb,2} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \quad (20)$$

Figura 5. Ciclo Rankine Ideal con Recalentamiento



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

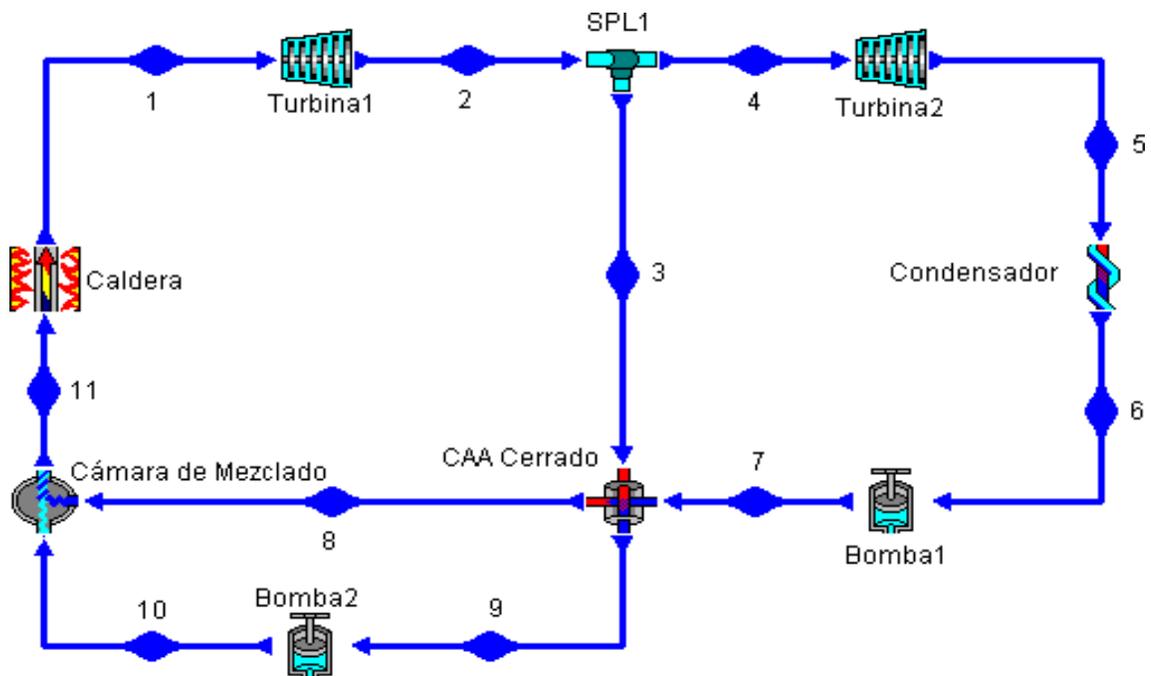
La incorporación de un recalentamiento simple en una planta de energía moderna mejora la eficiencia del ciclo en 4 o 5%, lo que incrementa la temperatura promedio a la cual el calor se añade al vapor. La temperatura promedio durante el proceso de recalentamiento puede incrementarse si aumenta el número de etapas de expansión y recalentamiento.

Conforme se incrementa el número de etapas, los procesos de expansión y recalentamiento se acercan a un proceso isotérmico a la temperatura máxima. Sin embargo, el uso de más de dos etapas de recalentamiento no es práctico.

El mejoramiento teórico en la eficiencia del segundo recalentamiento es cercano a la mitad del que se produce a partir del primer recalentamiento. Si la presión de entrada de la turbina no es lo suficientemente alta, el doble recalentamiento resultaría en un escape sobrecalentado. Esto es indeseable, porque causaría que la temperatura promedio para el rechazo de calor aumentara y de ese modo la eficiencia del ciclo disminuyera. Por tanto, el doble recalentamiento se emplea sólo en plantas de energía de presión supercrítica ($P > 22.09 \text{ MPa}$).

- ✓ **El Ciclo Rankine Ideal Regenerativo.** Un proceso de regeneración práctico en las plantas de energía a vapor se logra con la extracción, o drenado del vapor de la turbina en diversos puntos. Este vapor, que podría haber producido más trabajo si se expandía aún más en la turbina, se utiliza para calentar el agua de alimentación. El dispositivo donde el agua de alimentación se calienta mediante regeneración se llama regenerador, o calentador de agua de alimentación. La regeneración no sólo mejora la eficiencia del ciclo, sino que también proporciona un medio conveniente de deaerear el agua de alimentación para evitar la corrosión en la caldera. La Figura 6 describe este ciclo y fue obtenida a partir del programa CYCLEPAD, programa de cómputo especializado en la simulación de ciclos termodinámicos.

Figura 6. Ciclo Rankine Ideal Regenerativo



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- ✓ **Calentadores Abiertos de Agua de Alimentación.** Un calentador abierto de agua de alimentación (o de contacto) es una cámara de mezclado, donde el vapor extraído de la turbina se mezcla con el agua de alimentación que sale de

la bomba. En una situación ideal, la mezcla sale del calentador como líquido saturado a la presión del calentador.

En un ciclo Rankine ideal regenerativo el vapor entra a la turbina a la presión de la caldera y se expande isoentrópicamente hasta una presión intermedia. Se extrae un poco de vapor en este estado y se envía al calentador de agua de alimentación, en tanto que el vapor restante continúa su expansión isoentrópica hasta la presión del condensador. Este vapor sale del condensador como líquido saturado a la presión del condensador.

El agua condensada, que también recibe el nombre de agua de alimentación, entra luego a una bomba isoentrópica, donde se comprime hasta la presión del calentador del agua de alimentación y se envía al calentador de agua de alimentación donde se mezcla con el vapor extraído de la turbina.

La fracción del vapor extraído es tal que la mezcla sale del calentador como líquido saturado a la presión del calentador. Una segunda bomba eleva la presión del agua hasta la presión de la caldera. El ciclo concluye con el calentamiento del agua en la caldera hasta el estado de entrada de la turbina.

$$\begin{aligned}
 q_{en} &= h_5 - h_4 \\
 q_{sal} &= (1 - y)(h_7 - h_1) \\
 W_{turb, sal} &= (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \\
 W_{bomba, ent} &= (1 - y)W_{bomI, ent} + W_{bomII, ent}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

donde

$$\begin{aligned}
 y &= \dot{m}_6 / \dot{m}_5 \\
 W_{bombaI, ent} &= v_1(P_2 - P_1) \\
 W_{bombaII, ent} &= v_3(P_4 - P_3)
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

- ✓ **Calentadores Cerrados de Agua de Alimentación.** Otro tipo de calentador utilizado en las plantas de energía a vapor es el calentador cerrado de agua de alimentación. En este tipo de calentador, el calor se transfiere del vapor extraído al agua de alimentación sin que suceda ninguna mezcla. En este caso las dos corrientes pueden estar a presiones diferentes, ya que no se mezclan. En un calentador cerrado de agua de alimentación ideal, el agua de alimentación, se calienta hasta la temperatura de salida del vapor extraído, que idealmente abandona el calentador como líquido saturado a la presión de extracción.

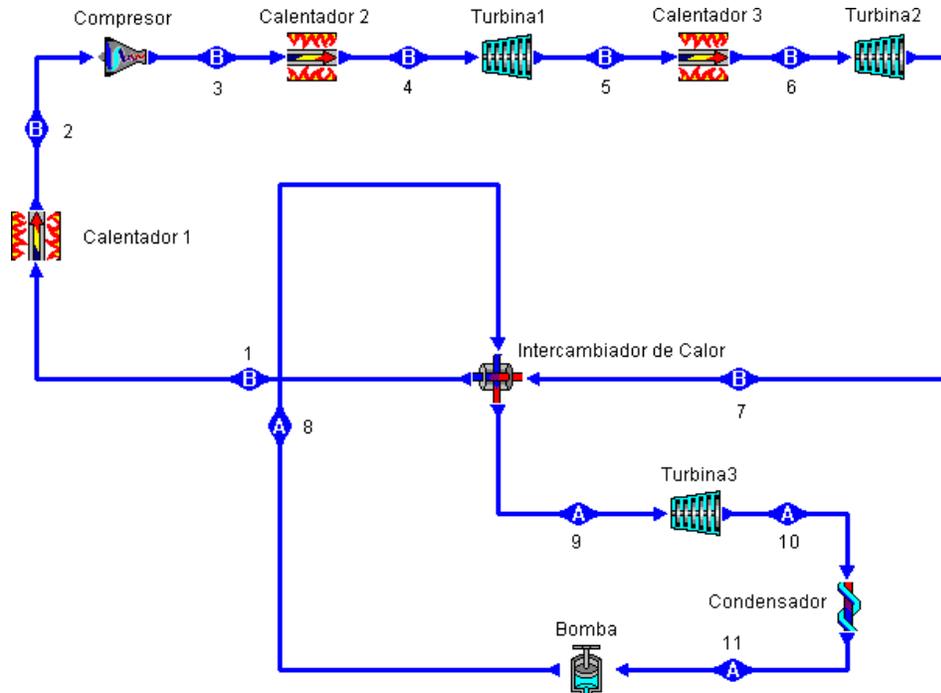
Realizando una comparación entre los tipos mencionados es posible concluir, que los calentadores abiertos son simples y económicos y tienen buenas características para la transferencia de calor; también llevan al agua de alimentación al estado de saturación, pero cada calentador requiere una bomba para manejar el agua de alimentación.

Mientras, los calentadores cerrados son más complejos debido a la red de tuberías internas, por lo que resultan más costosos. La transferencia de calor en los calentadores cerrados de agua de alimentación es menos efectiva puesto que no se permite que las dos corrientes entren en contacto directo. Sin embargo, los calentadores cerrados de agua de alimentación no requieren una bomba independiente para cada calentador, pues el vapor extraído y el agua de alimentación pueden estar a presiones diferentes.

- ✓ **Ciclo Combinado.** La continua búsqueda de eficiencias térmicas más altas ha originado modificaciones innovadoras en las plantas de potencia convencionales. El ciclo de vapor binario es una de esas modificaciones. Una aún más popular incluye un ciclo de potencia a gas que remata a un ciclo de potencia a vapor, que se denomina ciclo combinado de gas – vapor, o sólo ciclo combinado.

El ciclo combinado que se describe en la Figura 7, representa el ciclo de mayor interés de este tipo, está conformado por un ciclo de turbina a gas (Brayton), que finaliza al ciclo de turbina a vapor (Rankine), generando de esta manera la eficiencia térmica más alta que cualquiera de los ciclos ejecutados por separado.

Figura 7. Ciclo Combinado



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

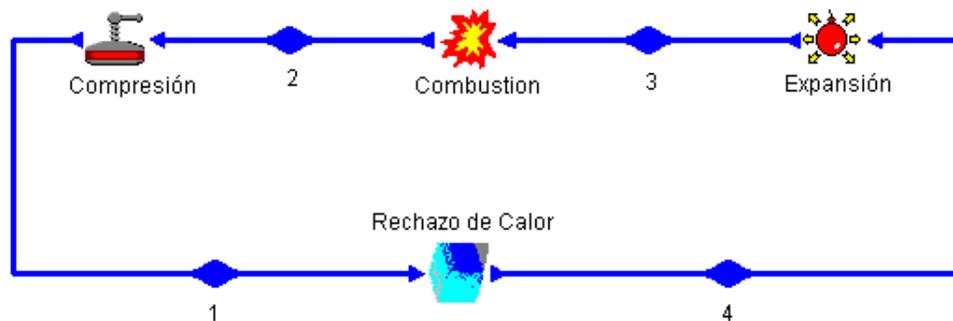
En este ciclo, la energía se recupera de los gases de escape y se transfiere al vapor en un intercambiador de calor que sirve como caldera. La energía para el proceso de recalentamiento puede ser suministrada quemando algún combustible adicional en los gases de escapes ricos en oxígeno. El ciclo combinado aumenta la eficiencia sin incrementar de modo apreciable el costo económico inicial en proyectos de generación en plantas de potencia; la eficiencia térmica de este ciclo se encuentre entre 40 – 60%.

3.3.2 CICLOS DE POTENCIA A GAS. Se tienen:

- ✓ **Ciclo Otto.** El análisis termodinámico de los ciclos de cuatro y dos tiempos reales son complejos, razón por la cual se utilizan suposiciones de aire estándar con la finalidad de simplificar su análisis. El ciclo que resulta y que se asemeja mucho a las condiciones de operación reales es el ciclo de Otto ideal⁶.

La Figura 8, ilustra las principales etapas y componentes presentes en este ciclo, además permite establecer los cuatro procesos que se describen a continuación.

Figura 8. Ciclo Otto



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Los cuatro procesos reversibles característicos del ciclo son:

- 1 – 2 Compresión isentrópica
- 2 – 3 Adición de calor a volumen constante
- 3 – 4 Expansión isentrópica
- 4 – 1 Rechazo de calor a volumen constante

⁶ ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta Edición. México : McGrawHill, 2003. p.447 – 459.

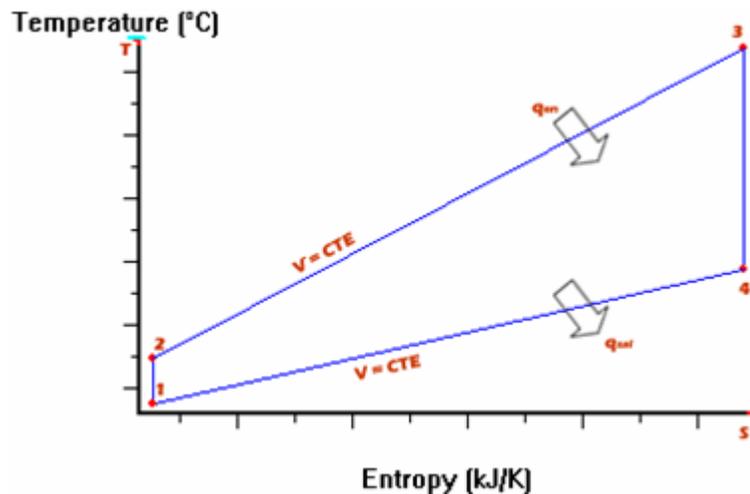
El ciclo Otto se ejecuta en un sistema cerrado, el balance de energía para cualquier proceso se expresa, por unidad de masa como

$$(q_{en} - q_{sal}) + (w_{en} - W_{sal}) = \Delta u \quad \therefore \quad (KJ / Kg) \quad (23)$$

Nada de trabajo está implicado durante los dos procesos de transferencia de calor, ya que ambos toman lugar a volumen constante. En consecuencia, la transferencia de calor hacia y desde un fluido de trabajo puede expresarse como

$$q_{en} = u_3 - u_2 = C_v(T_3 - T_2) \therefore \quad q_{sal} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1) \quad (24)$$

Figura 9. Diagrama T – S, Ciclo Otto



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Entonces la eficiencia térmica del ciclo de Otto ideal para aire estándar viene a ser

$$\eta_{t, Otto} = \frac{W_{neto}}{q_{en}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{en}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (25)$$

Los procesos 1 – 2 y 3-4 son isoentrópicos, y $v_2 = v_3$ y $v_4 = v_1$. De tal modo que

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad (26)$$

Al sustituir estas ecuaciones en la relación de la eficiencia térmica y simplificarse se obtiene

$$\eta_{t, Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (27)$$

donde

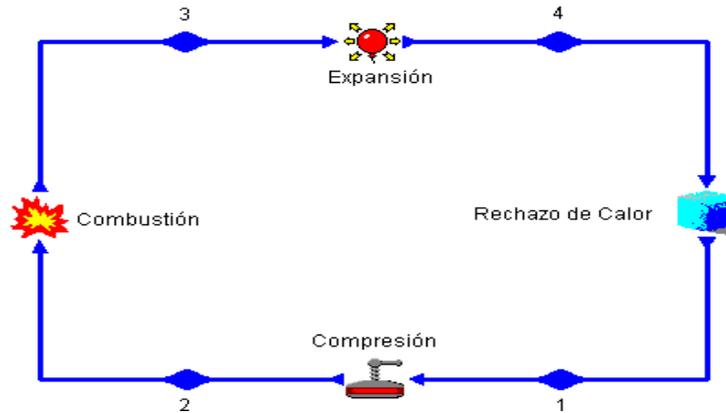
$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (28)$$

r es la relación de compresión y K es la relación de calores específicos C_p/C_v . La ecuación 27 muestra que bajo las suposiciones de aire estándar frío, la eficiencia térmica de un ciclo Otto depende de la relación de compresión de la máquina y de la relación de calores específicos del fluido de trabajo.

- ✓ **Ciclo Diesel.** Es el ciclo ideal para las máquinas de encendido por compresión. En los motores diesel el aire se comprime hasta una temperatura superior a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión inicia al contacto, cuando el combustible se introduce dentro de este aire caliente mediante un inyector.

Por otra parte, este tipo de motor se caracteriza por comprimir el aire sólo durante el tiempo de compresión, con lo cual se elimina la posibilidad de autoencendido. Por tanto, los motores diesel son diseñados para operar a relaciones de compresión, entre 12 y 24. A continuación se presenta en la Figura 10 los componentes característicos del ciclo.

Figura 10. Ciclo Diesel



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

El proceso de inyección de combustible en los motores diesel empieza cuando el émbolo se aproxima al punto muerto superior y continúa durante la primera parte de la carrera motriz. Por tanto, en estos motores el proceso de combustión sucede durante un periodo más largo. Debido a esta mayor duración, el proceso de combustión en el ciclo Diesel ideal se obtiene como un proceso de adición de calor a presión constante.

De hecho, éste es el único proceso donde los ciclos Otto y Diesel difieren. Los tres procesos restantes son los mismos para ambos ciclos ideales. Es decir, el proceso 1 – 2 es una compresión isoentrópica, el 3 – 4 es una expansión isoentrópica y el 4 – 1 es un rechazo de calor a volumen constante.

El ciclo Diesel se ejecuta en un dispositivo cilindro – émbolo, que forma un sistema cerrado. La cantidad de calor añadida al fluido de trabajo a presión constante y rechazada por él a volumen constante puede expresarse como

$$\begin{aligned}
 q_{en} - W_{b, sal} = u_3 - u_2 \rightarrow q_{en} &= P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) \\
 &= h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2)
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

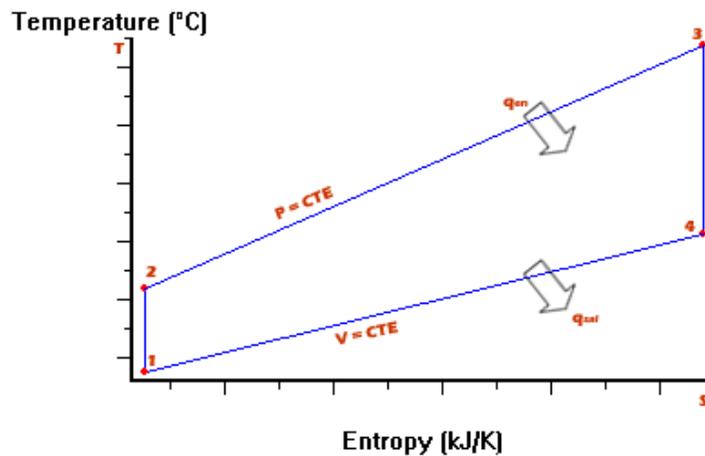
y

$$-q_{sal} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{sal} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1) \quad (30)$$

En ese caso la eficiencia térmica de un ciclo Diesel ideal bajo las suposiciones de aire frío estándar se vuelve

$$\eta_{t, Diesel} = \frac{W_{neto}}{q_{gen}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{gen}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (31)$$

Figura 11. Diagrama T- S, Ciclo Diesel

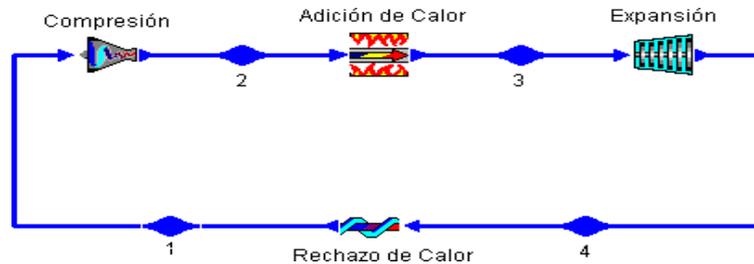


Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- ✓ **Ciclo Brayton Ideal.** El ciclo Brayton principalmente es empleado en turbinas de gas donde los procesos, tanto de compresión como de expansión, suceden en maquinaria rotativa. Las turbinas de gas generalmente operan en un ciclo abierto. Aire fresco a condiciones ambiente se introduce dentro de un compresor donde su temperatura y presión se eleva. El aire de alta presión sigue hacia la cámara de combustión donde el combustible se quema a presión constante.

Luego los gases a alta temperatura que resultan entran a la turbina, donde se expanden hasta la presión atmosférica, de tal forma que producen potencia. Los gases de escape que salen de la turbina se expulsan hacia afuera, lo que provoca que el ciclo se clasifique como un ciclo abierto.

Figura 12. Ciclo Brayton Ideal



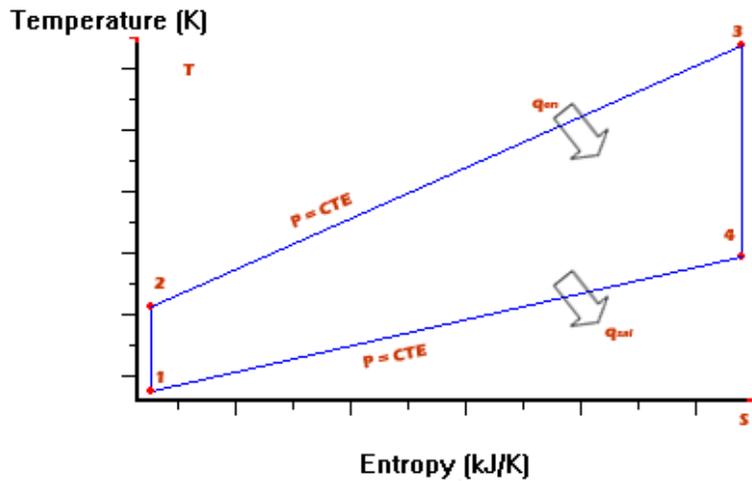
Fuente: Autor del Trabajo de Grado

El ciclo de turbina de gas abierto recién descrito puede modelarse como un ciclo cerrado, mediante las suposiciones de aire estándar. En este caso los procesos de compresión y expansión permanecen iguales, pero el proceso de combustión se sustituye por un proceso de adición de calor a presión constante de una fuente externa, el proceso de escape se reemplaza por uno de rechazo de calor a presión constante hacia el aire ambiente.

El ciclo ideal que el fluido de trabajo experimenta en este ciclo cerrado es el ciclo Brayton que está integrado por cuatro procesos reversibles:

- 1 – 2** Compresión isentrópica
- 2 – 3** Adición de calor a presión constante
- 3 – 4** Expansión isentrópica (en una turbina)
- 4 – 1** Rechazo de calor a presión constante

Figura 13. Diagrama T- S Ciclo Brayton Ideal



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Note que los cuatro procesos de este ciclo se ejecutan en dispositivos de flujo constante, de esa manera deben analizarse como procesos de flujo estable. Cuando los cambios en las energía cinéticas y potencial se ignoran, la ecuación de conservación de la energía para un proceso de flujo estable puede expresarse, por unidad de masa, como

$$(Q_{en} - Q_{sal}) + (W_{en} - W_{sal}) = h_{sal} - h_{en} \quad (32)$$

Por lo tanto, la transferencia de calor hacia y del fluido de trabajo es

$$Q_{en} = h_3 - h_2 = Cp(T_3 - T_2) \therefore Q_{sal} = h_4 - h_1 = Cp(T_4 - T_1) \quad (33)$$

En este caso la eficiencia térmica del ciclo Brayton ideal bajo las suposiciones de aire frío estándar se convierte en

$$\eta_{t, Brayton} = \frac{W_{neto}}{q_{en}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{en}} = 1 - \frac{Cp(T_4 - T_1)}{Cp(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (34)$$

Los procesos 1 – 2 y 3 – 4 son isoentrópicos y $P_2 = P_3$ y $P_4 = P_1$. Por tanto,

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/K} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/K} = \frac{T_3}{T_4} \quad (35)$$

Si se sustituyen estas ecuaciones en la relación de eficiencia térmica y se simplifican se obtiene

$$\eta_{t, \text{Brayton}} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \therefore r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad (36)$$

r es la relación de presiones y k la relación de calores específicos. Las relaciones anteriores muestran que bajo las suposiciones de aire frío estándar, la eficiencia térmica de un ciclo Brayton ideal depende de la relación de presiones de la turbina de gas y de la relación de calores específicos del fluido de trabajo.

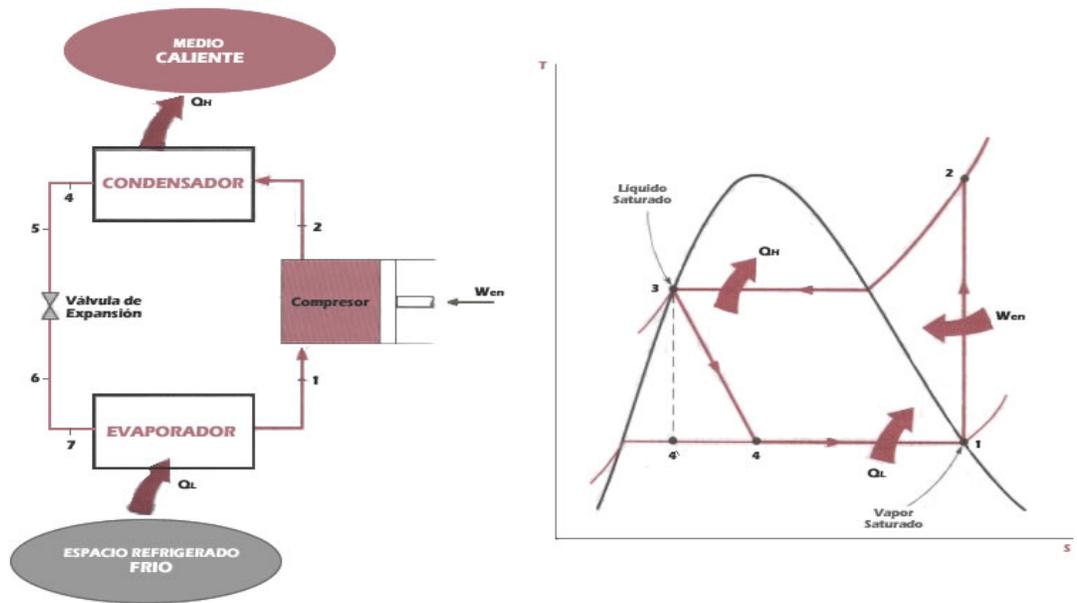
3.3.3 CICLOS DE REFRIGERACIÓN. Se tienen:

- ✓ **Ciclo Ideal de Refrigeración por Compresión de Vapor.** Muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo invertido de Carnot se eliminan al evaporar el refrigerante por completo antes de que se comprima y al sustituir la turbina con un dispositivo de estrangulamiento, tal como una válvula de expansión.

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor⁷ es el que más se emplea en refrigeradores, sistemas de acondicionamiento de aire y bombas de calor. Se compone de cuatro procesos:

⁷ ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta Edición. México : McGrawHill, 2003. p. 551 – 562.

Figura 14. Ciclo Ideal de Refrigeración por Compresión de Gas



Fuente: ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta Edición.

- 1 – 2 Compresión isentrópica en un compresor
- 2 – 3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- 3 – 4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión.
- 4 – 1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador.

En un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante entra al compresor en el estado 1 como vapor saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión del condensador. Durante el proceso de compresión isentrópico, la temperatura del refrigerante aumenta hasta un valor bastante superior a la temperatura del medio circundante.

Después, el refrigerante entra en el condensador como vapor sobrecalentado en el estado 2 y sale como líquido saturado en el estado 3, como resultado del rechazo de calor hacia los alrededores.

El refrigerante líquido – saturado en el estado 3 se estrangula hasta la presión del evaporador al pasar por una válvula de expansión o por un tubo capilar. La temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio refrigerado durante este proceso. El refrigerante ingresa al evaporador en el estado 4 como una mezcla saturada de baja calidad, y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado. El refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor, con lo cual completa el ciclo.

- ✓ **Sistemas de Refrigeración en Cascadas.** En algunas aplicaciones industriales son necesarias temperaturas moderadamente bajas, y el intervalo de temperatura que implican es demasiado grande para que un ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor resulte práctico. Un gran intervalo de temperatura significa también un gran nivel de presión en el ciclo y un pobre desempeño en un compresor reciprocante. Una manera de enfrentar esas situaciones es efectuar el proceso de refrigeración en ciclos que operan en serie. Dichos ciclos reciben el nombre de ciclos de refrigeración en cascada,

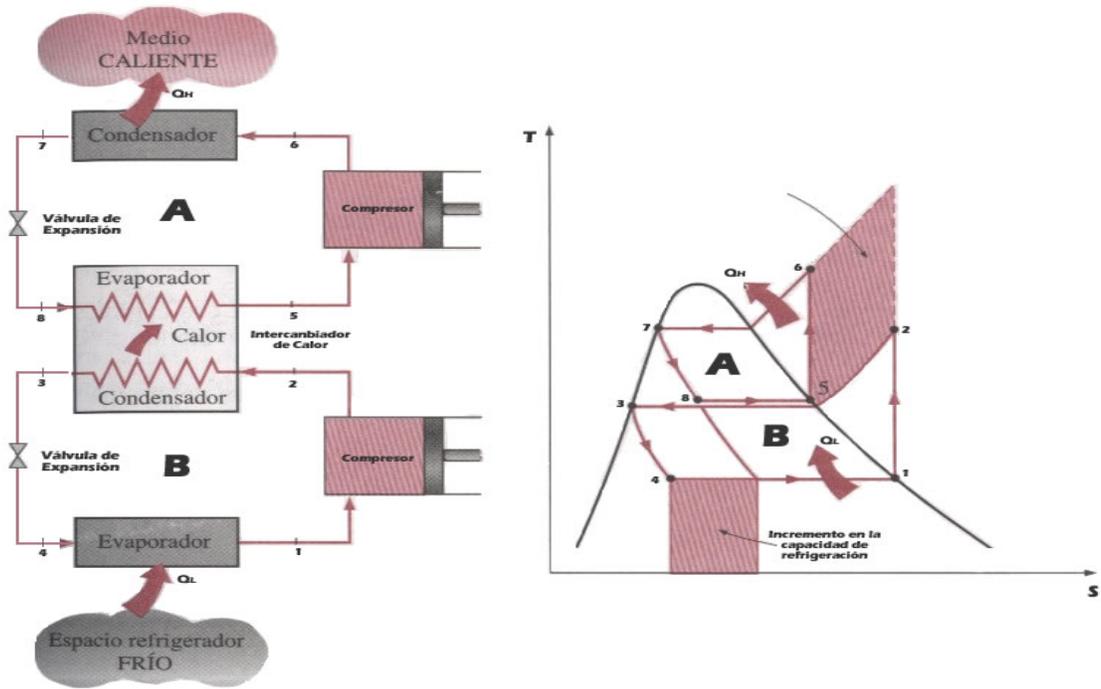
Un ciclo de refrigeración en cascada de dos etapas se ilustra en la Figura 15. Los dos ciclos se conectan de medio de un intercambiador de calor en medio de ambos, el cual sirve como el evaporador en el ciclo superior (ciclo A) y como el condensador en el ciclo inferior (ciclo B). Si se supone que el intercambiador de calor está bien aislado y las energías cinética y potencial son despreciables, la transferencia de calor del fluido en el ciclo inferior debe ser igual a la transferencia de calor del fluido en el ciclo superior. De modo que la relación de las tasas de flujos másicos en cada ciclo debe ser

$$\dot{m}_A(h_5 - h_8) = \dot{m}_B(h_2 - h_3) \rightarrow \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8} \quad (37)$$

Además,

$$C\dot{D}F_{R,cascada} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{neto,en}} = \frac{\dot{m}_B(h_1 - h_4)}{\dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)} \quad (38)$$

Figura 15. Sistema de Refrigeración en Cascada de 2 Etapas



Fuente: ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta Edición.

En el sistema de cascada que se ilustra, los refrigerantes en ambos ciclos se suponen iguales. Sin embargo, esto no es necesario puesto que no se produce mezcla en el intercambiador de calor. Por tanto, los refrigerantes con características más deseables pueden utilizarse en cada ciclo. En este caso, habría una curva de saturación independiente para cada fluido y el diagrama T - S para uno de los ciclos sería diferente. Además, en los sistemas reales de refrigeración en cascada, los dos ciclos se traslaparían un poco, ya que una diferencia de temperatura entre los dos fluidos es necesaria para que suceda alguna transferencia de calor.

A partir del diagrama T – S de la Figura 15, se deduce que el trabajo del compresor disminuye y que la cantidad de calor absorbido del espacio refrigerado aumenta como resultado de las etapas en cascada. Por tanto, el sistema en cascada mejora el CDF (Coeficiente de Funcionamiento) de un sistema de refrigeración.

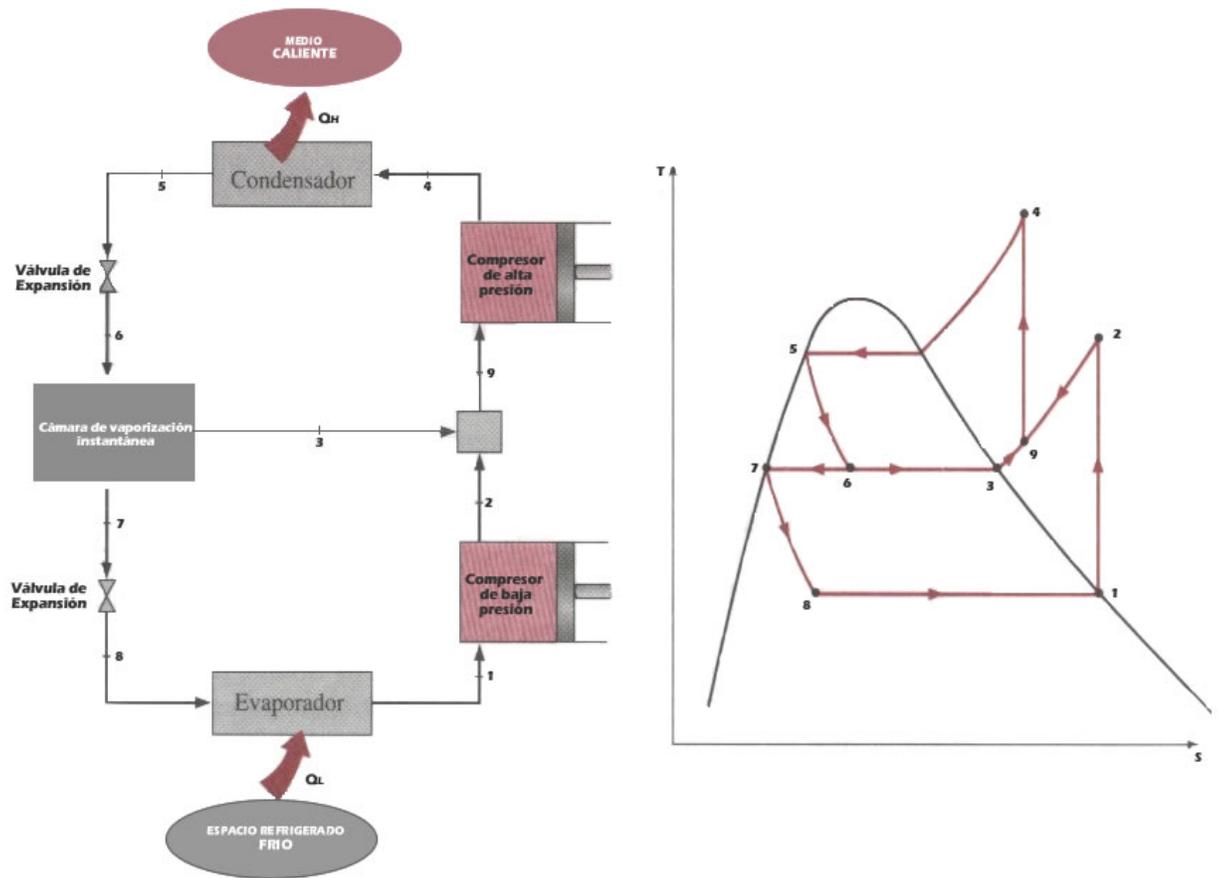
- ✓ **Refrigeración por Compresión de Múltiples Etapas.** Cuando el fluido es utilizado en el sistema de refrigeración en cascada, el intercambiador de calor entre las etapas puede sustituirse por una cámara de mezcla, que cuenta con mejores características de transferencia de calor.

En la Figura 16 se presenta un sistema de refrigeración por compresión de 2 etapas con una cámara de evaporación y su diagrama T – S.

En este sistema el refrigerante líquido se expande en la primera válvula de expansión hasta la presión de la cámara de evaporación, que es la misma que la presión interetapas del compresor. Parte del líquido se evapora durante este proceso. Este vapor saturado (estado 3) se mezcla con el vapor sobrecalentado del compresor de baja presión (estado 2), y la mezcla entra al compresor de alta presión en el estado 9.

Esto es, en esencia, un proceso de regeneración. El líquido saturado (estado 7) se expande a través de la segunda válvula de expansión hacia el evaporador, donde recoge calor del espacio refrigerado. El proceso de compresión en este sistema se asemeja a una compresión de dos etapas con interenfriamiento, y el trabajo del compresor disminuye.

Figura 16. Sistema de Refrigeración por Compresión



Fuente: ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta Edición.

4. PROCESOS DE MÉCANICA DE FLUIDOS

4.1 MEDICIÓN DE FLUJO

Las mediciones en fluidos comprenden la determinación de la elevación, la presión, la velocidad, la temperatura y la concentración. También se requieren tasas de transporte de calor, masas y de momentum que típicamente se deducen de las mediciones antes mencionadas. Los sistemas de instrumentación modernos permiten la medición de grandes cantidades de datos a tasas de muestreo altas, y por consiguiente, en este numeral se presentarán algunos de los elementos, funciones y terminología más representativa en torno a procedimientos de medición⁸.

Un medidor de caudal o tasa es un aparato que determina, generalmente mediante una medida única, la cantidad (peso o volumen) por unidad de tiempo que pasa por una sección transversal dada. Dentro de los medidores de tasa se incluyen el orificio, la boquilla, el medidor venturi, el rotámetro y el vertedero.

4.4.1 Medidores de Presión Diferencial. Los medidores de presión diferencial son muy utilizados en aplicaciones industriales y laboratorios por su simplicidad, confiabilidad, robustez y bajo costo. En esta sección se presentarán los tres tipos de uso más común: el medidor orificio, el medidor venturi y la tobera de flujo. Su operación está basada en el principio de una obstrucción de flujo presente en un ducto o tubería, y por consiguiente, existirá una diferencial de presión a través de la obstrucción. Esta caída de presión puede ser correlacionada con la descarga

⁸ STREETER, Víctor, WYLIE, Benjamín y BEDFORD, Keith. Mecánica de Fluidos. Colombia : McGrawHill, 2000. p. 444 y 466.

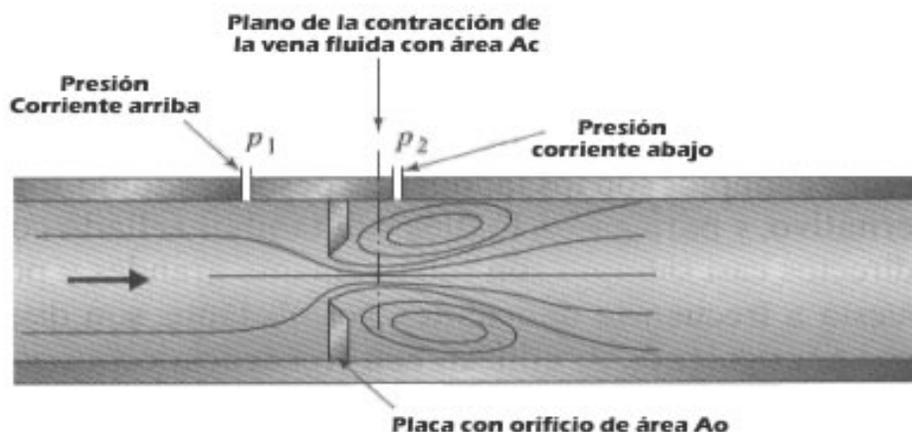
por medio de una calibración, y posteriormente, la curva presión – descarga es utilizada para determinar la descarga leyendo la presión diferencial.

La relación de descarga fundamental para el medidor de presión diferencial se ilustra en la Figura 17, en la cual se representa un medidor de orificio de placa delgada, la cual puede ser considerada como un medidor de presión diferencial.

Considere un flujo continuo que ocurre a través de un ducto circular, que se encuentra con el orificio restrictivo de área A_0 , y continúa como un chorro corriente abajo. Corriente debajo de la restricción, las líneas de corriente convergen y forman un área de flujo mínima A_c , denominada contracción de la vena fluida. En dos posiciones se localizan insertos de presión: corriente arriba de la restricción en la región de flujo no perturbado (sección 1) y corriente abajo en algún lugar cerca de la contracción de la vena fluida (sección 2). Si se supone un fluido incompresible, ideal, sin fricción, la ecuación de Bernoulli aplicada a lo largo de la línea de corriente central a partir del lugar corriente arriba hasta la contracción de la vena fluida es

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_c^2}{2g} + \frac{p_c}{\gamma} + z_c \quad (39)$$

Figura 17. Flujo a Través de un Medidor de Orificio



Fuente: POTTER, Merle y WIGGERT, David. Mecánica de Fluidos.

Asimismo, la ecuación de continuidad es

$$V_1 A_1 = V_c A_c \quad (40)$$

Si se combinan las ecuaciones 39 y 40 y se resuelven para V_c se obtiene

$$V_c = \frac{\sqrt{2g(h_1 - hc)}}{\sqrt{1 - (A_c / A_1)^2}} \quad (41)$$

en la cual

$$h_1 = \frac{p_1}{\gamma} + z_1 \quad \therefore \quad hc = \frac{p_c}{\gamma} + z_c \quad (42)$$

La descarga ideal Q_i es igual al área multiplicada por la velocidad promedio en la contracción de la vena fluida:

$$Q_i = A_c V_c \quad (43)$$

Reemplazando

$$Q_i = \frac{A_c}{\sqrt{1 - (A_c / A_1)^2}} \sqrt{2g(h_1 - hc)} \quad (44)$$

La descarga difiere de la ideal por dos razones principales. A causa del flujo de fluido real, la fricción provoca que la velocidad en la línea media sea mayor que la velocidad promedio en cada sección transversal. En segundo lugar, la carga piezométrica h_c , evaluada en la contracción de la vena fluida en la relación, es sustituida por h_2 la lectura conocida en el inserto de presión corriente abajo.

Además, como el área de la contracción de la vena fluida no es conocida, en la ecuación 44 conviene reemplazar A_c con $C_c A_0$, donde C_c es el coeficiente de contracción. Estas anomalías son tomadas en cuenta con la introducción de un

coeficiente de descarga C_d , el cual es el producto del coeficiente de contracción y un coeficiente de velocidad, de modo que la descarga Q está dada por la relación

$$Q = \frac{C_d A_o}{\sqrt{1 - (C_c A_o / A_1)^2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (45)$$

Para una sección transversal circular, la cual es típica de la mayoría de los medidores de presión diferencial, conviene introducir la relación de diámetro

$$\beta = \sqrt{\frac{A_o}{A_1}} = \frac{D_o}{D} \quad (46)$$

Donde D es el diámetro del tubo. Una forma conveniente de expresar la ecuación 45 es

$$Q = K A_o \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (47)$$

En la cual K es el coeficiente de flujo

$$K = \frac{C_d}{\sqrt{1 - C_c^2 \beta^4}} \quad (48)$$

Un análisis dimensional revela que C_d y K dependen del número de Reynolds, definido como:

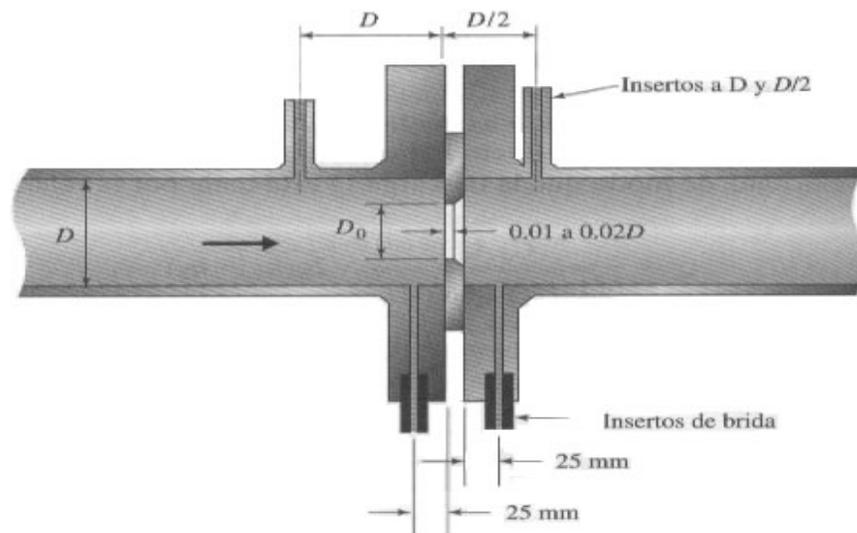
$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (49)$$

Donde L y V son una longitud y velocidad característica, respectivamente, ν es la viscosidad cinemática. Conviene evaluar el número de Reynolds en la región de aproximación o en la región de obstrucción.

4.1.2 Medidor de Orificio. Un medidor de orificio de placa delgada por lo general se fabrica en el intervalo $0.2 \leq \beta \leq 0.8$. En la figura 18, se muestran dos formas de localizar los insertos de presión:

1. Insertos de brida, colocados a 25 mm corriente arriba y corriente debajo de la placa de orificio.
2. Insertos colocadas a un diámetro corriente arriba y medio diámetro corriente debajo de la placa.
3. Se prefiere la segunda disposición, puesto que es capaz de detectar una presión de diferencial fuerte, y se ajusta a las leyes de similitud geométrica. Una tercera disposición, tiene insertos de presión localizados en la pared del tubo inmediatamente corriente arriba y corriente abajo del orificio; los insertos colocados en este lugar se denominan insertos esquineros.

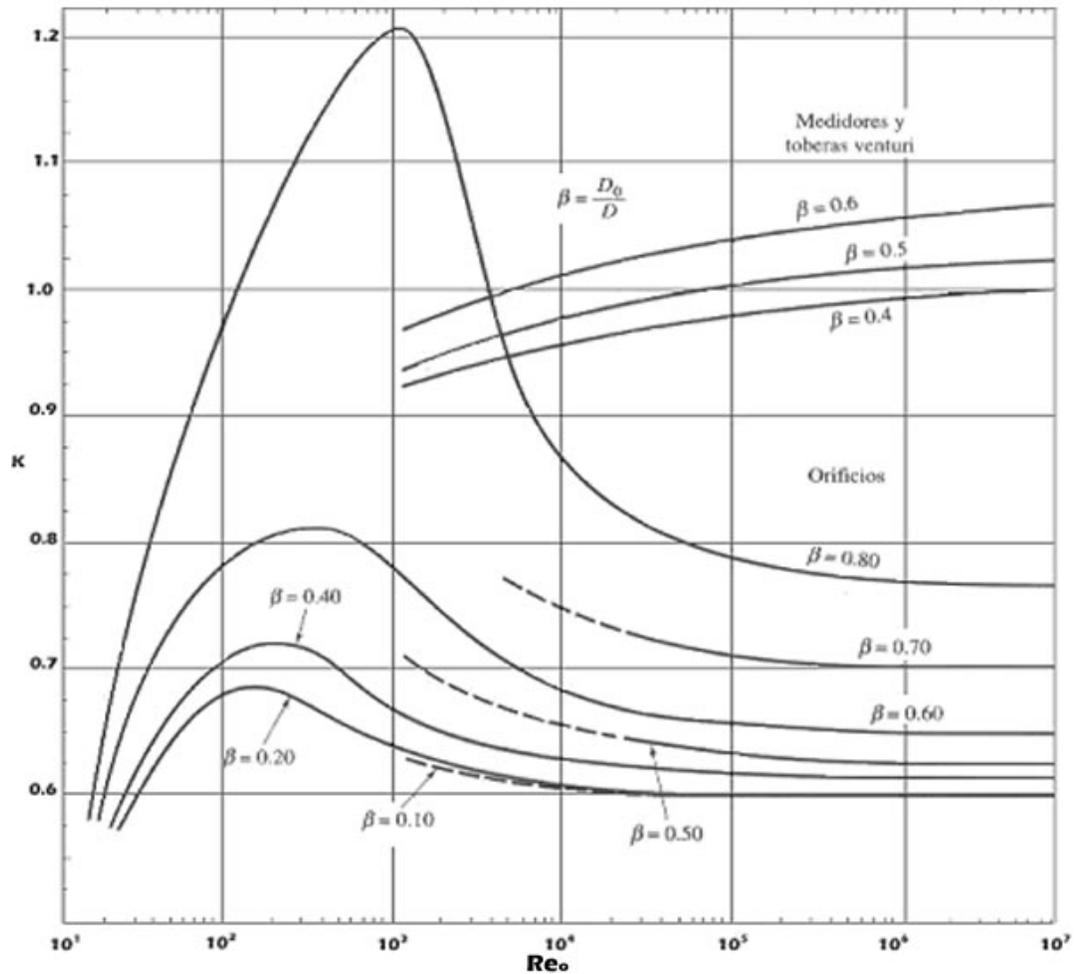
Figura 18. Detalles de un Medidor de Orificio de Placa Delgada



Fuente: POTTER, Merle y WIGGERT, David. Mecánica de Fluidos.

La Figura 19 muestra valores experimentales de terminados del coeficiente de flujo K para orificios como función de β y Re_o . Estos datos se obtuvieron mediante insertos esquineros. Observe que con β dado, K llega a ser casi constante con números de Reynolds (Re) altos, pero a medida que el número de Reynolds se reduce, K primero se incrementa al máximo y luego disminuye.

Figura 19. Coeficiente de Flujo K Contra Número de Reynolds



Fuente: POTTER, Merle y WIGGERT, David. Mecánica de Fluidos.

Los valores máximos de K suceden con el Reynolds entre 100 y 1000, según el valor de β , en este caso K se ve dominado por el área reducida de la contracción

de la vena fluida. Si se conoce la descarga, entonces se conoce el número de Reynolds en el orificio.

Por consiguiente, con la Figura 19 se puede leer K directamente, y posteriormente determinar $(h_1 - h_2)$ con la ecuación 47. Sin embargo, es más probable que se utilice la figura junto con la ecuación 47 para determinar la velocidad de flujo, dado que $(h_1 - h_2)$ se leyó con el manómetro o transductor de presión.

En esa situación, K se conoce a priori, puesto que depende de Re_0 . Inicialmente se puede estimar K con base en un Re_0 supuesto (en general, Re_0 se considera grande), y posteriormente mediante prueba y error se mejora mediante sustitución sucesiva en la ecuación 47. Sin embargo, si han de tomarse varias lecturas, conviene determinar una fórmula de calibración de la forma

$$Q = C(h_1 - h_2)^m \quad (50)$$

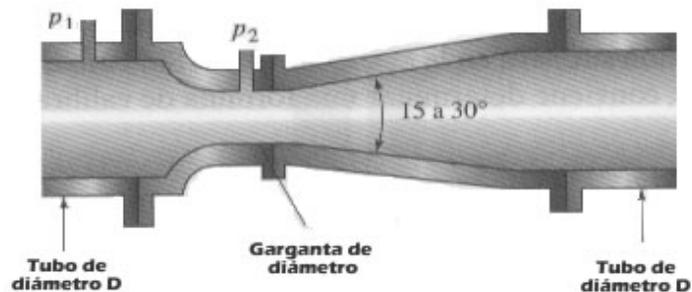
En la cual C y m son constantes determinadas mediante un criterio de “mejor ajuste”. El orificio ha llegado a ser el medidor diferencial más utilizado para medir líquidos. Esto es comprensible, puesto que es relativamente barato y fácil de colocar en una tubería existente. Una desventaja es que produce una gran pérdida de carga que no puede ser recuperada corriente abajo del orificio.

4.1.3 Medidor Vénturi. El medidor vénturi tiene una forma que intenta imitar los patrones de flujo a través de una obstrucción aerodinámica en una tubería. El tipo clásico o Herschel de medidor vénturi rara vez se utiliza en la actualidad, puesto que sus dimensiones son bastantes grandes, lo que lo hace difícil de instalar y costoso de fabricar. Consiste en una contracción cónica a 21° , seguida por una garganta cilíndrica corta, que conduce a una expansión de salida cónica a 7° u 8° .

El coeficiente de descarga es casi unitario. En contraste, el tubo vénturi contemporáneo, mostrado en la Figura 20, se compone de una sección de entrada y de tobera de flujo estándar [ISA 1932 estándar (Bean, 1971)] y una expansión de

salida cónica no mayor a 30° . Su intervalo recomendado de números de Reynolds varia entre 1.5×10^5 y 2×10^6 .

Figura 20. Medidor Vénturi



Fuente: POTTER, Merle y WIGGERT, David. Mecánica de Fluidos.

La ecuación 47 es válida tanto para el venturi como para el orificio; en la Figura 19 se muestran valores representativos del coeficiente de flujo K . A causa del perfilado aerodinámico del pasaje de flujo, la pérdida de flujo en el medidor venturi es mucho menor que en el orificio. La contracción de la vena fluida no está presente, y por consiguiente el coeficiente de descarga C_d permanece próximo a la unidad.

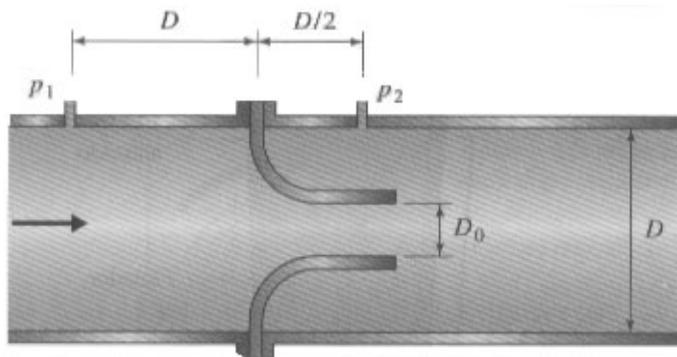
El medidor venturi tiene unas pérdidas totales bajas debido a la región cónica que se expande gradualmente, la cual ayuda a la reconversión de la energía cinética alta en la garganta a energía de presión. La pérdida es aproximadamente de 10 al 15% del cambio de cabeza entre las secciones 1 y 2.

4.1.4 Tobera de Flujo. Es un dispositivo de forma estándar con insertos de presión localizado por lo general a un diámetro corriente arriba de la entrada y a medio diámetro corriente abajo. La tobera de flujo se ilustra en la Figura 21.

Existen dos dispositivos estándar, de radio largo o de radio corto. Por la falta de una sección de expansión corriente abajo de la tobera, la pérdida de carga total

es similar a la de un orificio, excepto que la contracción de la vena fluida prácticamente se elimina y el coeficiente de descarga es casi unitario. Asimismo, cuando los insertos de presión están localizados a $D:D/2$, el coeficiente de flujo K varía con el número de Reynolds de una manera casi idéntica a la del medidor venturi.

Figura 21. Tobera de Flujo



Fuente: POTTER, Merle y WIGGERT, David. Mecánica de Fluidos.

La tobera de flujo tiene la ventaja sobre la placa de orificio en que es menos susceptible a la erosión y el desgaste, y comparada con el medidor venturi, es más económica y simple de instalar.

5. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

5.1 CONDICIONES DE FRONTERA

Para determinar la distribución de temperatura en un medio es necesario resolver la forma apropiada de la ecuación de calor. Sin embargo, esta solución depende de las condiciones físicas que existan en las fronteras del medio y, si la situación depende del tiempo, también dependerá de las condiciones que existan en el medio en algún tiempo inicial. Con respecto a las condiciones de frontera, hay varias posibilidades comunes que simplemente se expresan en forma matemática. Como la ecuación de calor es de segundo orden en las coordenadas espaciales, deben expresarse dos condiciones de frontera para cada coordenada necesaria en la descripción del sistema. Sin embargo, dado que la ecuación es de primer orden en el tiempo, debe especificarse sólo una condición denominada condición inicial.⁹,

Las tres clases de condiciones de frontera que normalmente se encuentran en la transferencia de calor se resumen en la Tabla 1. Las condiciones se especifican en la superficie $x = 0$ para un sistema unidimensional. La transferencia de calor es en la dirección X positiva con la distribución de temperaturas, que puede ser dependiente del tiempo, designada como $T(x, t)$.

⁹ INCROPERA, Frank y DE WITT, David. Fundamentos de Transferencia de Calor. Cuarta Edición. México : Prentice Hall, 2002. p. 60 – 61.

Tabla 1. Condiciones de Frontera

Condiciones de Frontera para la ecuación de difusión de calor en la superficie (x = 0)	
1. Temperatura superficial constante	$T(0,t) = T_s$
2. Flujo de calor superficial constante a. Flujo finito de calor b. Superficie adiabática o aislada	a. $-k \partial T / \partial x_{x=0} = q''_s$ b. $\partial T / \partial x_{x=0} = 0$
3. Condición de convección superficial	c. $-k \partial T / \partial x_{x=0} = h [T_\infty - T(0,t)]$

Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

La primera condición corresponde a una situación en que la superficie se mantiene a una temperatura fija T_s . Ésta se denomina normalmente condición de Dirichlet, o condición de frontera de primera clase. Se aproxima mucho, por ejemplo, cuando la superficie está en contacto con un sólido que se funde o con un líquido en ebullición. En ambos casos hay transferencia de calor a la superficie, mientras que la superficie permanece a la temperatura del proceso de cambio de fase.

La segunda condición corresponde a la existencia de un flujo de calor fijo o constante q''_s en la superficie. Este flujo de calor se relaciona con el gradiente de temperatura en la superficie mediante la ley de Fourier, que se expresa como:

$$q''_x(0) = -k \partial T / \partial x \Big|_{x=0} \quad (51)$$

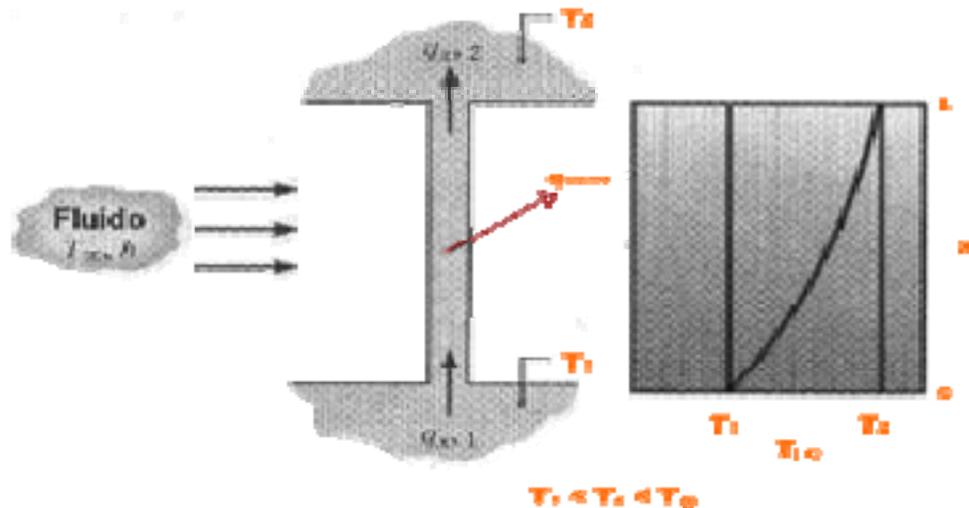
Esta se denomina condición de Neumann, o condición de frontera de segunda clase, y se logra uniendo un calentador eléctrico de película delgada o de parche a la superficie. Un caso especial de esta condición corresponde a la superficie perfectamente aislada, o adiabática, para la que $\partial T / \partial x_{x=0} = 0$.

La tercera condición corresponde a la existencia de calentamiento o enfriamiento por convección en una de las superficies; es decir, se conoce la temperatura de uno de los ambientes T_a a la cual está expuesta la superficie en estudio, con su respectivo coeficiente de transferencia de calor por convección h .

5.2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS

La frase superficie extendida se usa normalmente con referencia a un sólido que experimenta transferencia de energía por conducción dentro de sus límites, así como transferencia de energía por convección (y/o radiación) entre sus límites y los alrededores. Tal sistema se muestra de forma esquemática en la Figura 22. Se usa un puntal para proporcionar soporte mecánico a dos paredes que están a temperaturas diferentes. Un gradiente de temperatura en la dirección x mantiene la transferencia de calor por conducción internamente, al mismo tiempo que hay una transferencia de energía por convección desde la superficie¹⁰.

Figura 22. Conducción y Convección Combinadas



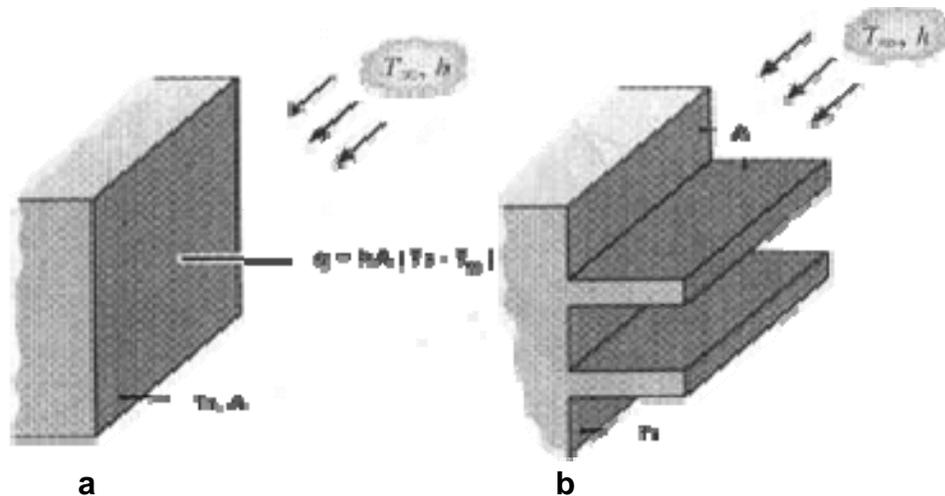
Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

¹⁰ INCROPERA, Frank y DE WITT, David. Fundamentos de Transferencia de Calor. Cuarta Edición. México : Prentice Hall, 2002. p. 110 - 113.

Aunque hay muchas situaciones diferentes que implican efectos combinados de conducción y convección, la aplicación más frecuente es aquella en la que se usa una superficie extendida de manera específica para aumentar la rapidez de transferencia de calor entre un sólido y un fluido contiguo. Esta superficie extendida se denomina aleta.

Considere la pared plana de la Figura 23a. Si T_s es fija, hay dos formas en las que es posible aumentar la transferencia de calor. El coeficiente de convección h podría aumentarse incrementando la velocidad del fluido, y/o podría reducirse la temperatura de fluido T_∞ . Sin embargo, se encuentran muchas situaciones en las que aumentar h al valor máximo posible es insuficiente para obtener la transferencia de calor que se desea o en las que los costos asociados son prohibitivos.

Figura 23. Uso de Aletas para Aumentar la Transferencia de Calor



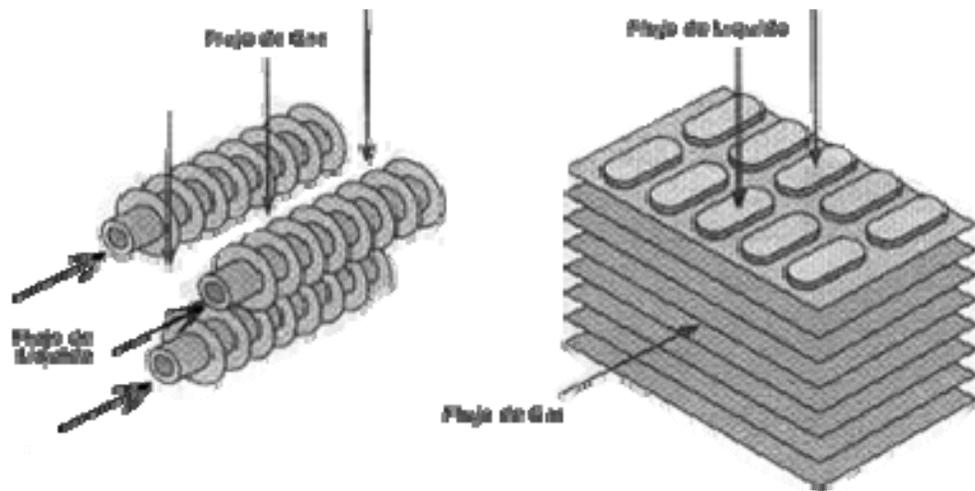
Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

Estos costos están relacionados con los requerimientos de potencia del ventilador o de bomba necesarios para aumentar h a través de un creciente movimiento de fluido. Más aún, la segunda opción de reducir T_∞ es a menudo poco práctica.

Sin embargo, al examinar la Figura 23b, vemos que existe una tercera opción. Es decir, la transferencia de calor se incrementa aumentando el área de la superficie a través de la cual ocurre la convección. Esto se logra con el empleo de aletas que se extienden desde la pared al flujo circundante. La conductividad térmica del material de la aleta tiene fuerte efecto sobre la distribución de temperaturas a lo largo de la aleta y, por tanto, influye en el grado al que la transferencia de calor aumenta. Idealmente, el material de la aleta debe tener una conductividad térmica grande para minimizar variaciones de temperatura desde la base hasta la punta.

En el límite de la conductividad térmica infinita, toda la aleta estaría a la temperatura de la base de la superficie, proporcionando con ello el máximo aumento posible de transferencia de calor. En la Figura 24 se muestran dos arreglos comunes tubo – aleta.

Figura 24. Esquema de Intercambiadores de Tubos con Aletas

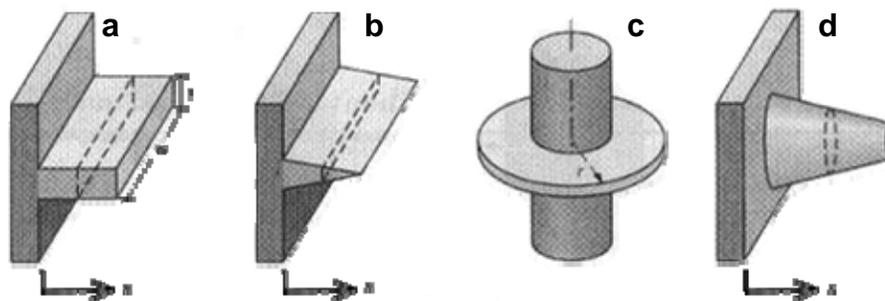


Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

En la Figura 25 se muestran diferentes configuraciones de aletas. Una aleta recta es cualquier superficie prolongada que se une a una pared plana. Puede ser de área de sección transversal uniforme, o el área de sección transversal puede variar con la distancia x de la pared.

Una aleta anular es aquella que se une de forma circunferencial al cilindro, y su sección transversal varía con el radio desde la línea central del cilindro. Los tipos de aleta precedentes tienen secciones transversales rectangulares, cuya área se expresa como un producto del espesor de la aleta t y del ancho w para aletas rectas o la circunferencia $2\pi r$ para aletas anulares.

Figura 25. Configuraciones de Aletas



Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

Tabla 2. Configuraciones de Aletas

a	Aleta recta de sección transversal uniforme
b	Aleta recta de sección transversal no uniforme
c	Aleta anular
d	Aleta de aguja

Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

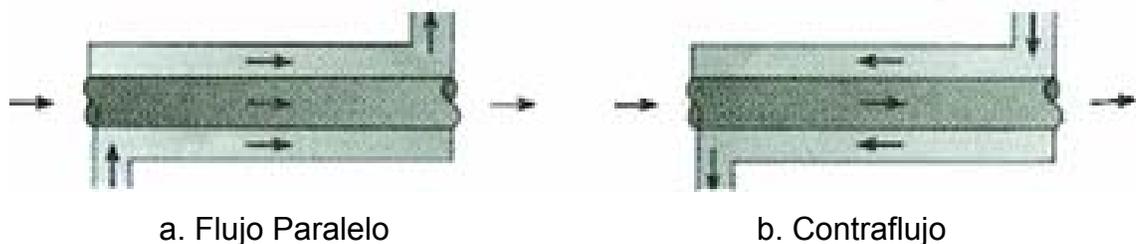
En contraste, una aleta de aguja, o spine, es una superficie prolongada de sección transversal circular. Las aletas agujas también pueden ser de sección transversal uniforme o no uniforme. En cualquier aplicación, la selección de una configuración de aletas particular depende de consideraciones de espacio, fabricación y costos, así como del punto al que las aletas reducen el coeficiente de convección de la superficie y aumentan la caída de presión asociada con un flujo sobre ellas.

5.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR

El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas y separados por una pared sólida ocurre en muchas aplicaciones de ingeniería. El dispositivo que se utiliza para llevar a cabo este intercambio de calor se denomina intercambiador de calor, y las aplicaciones específicas se pueden encontrar en calefacción de locales y acondicionamiento de aire, producción de potencia, recuperación de calor de desecho y algunos procesamientos químicos¹¹.

Los intercambiadores normalmente se clasifican de acuerdo con el arreglo del flujo y el tiempo de construcción. El intercambiador de calor más simple es aquel en que los fluidos calientes y fríos se mueven en la misma dirección o en direcciones opuestas en una construcción de tubos concéntricos. En el arreglo de la Figura 26a, los fluidos caliente y frío entra por el mismo extremo, fluyen en la misma dirección y salen por el mismo extremo. En el arreglo de contraflujo de la Figura 26b, los fluidos entran por extremos opuestos, fluyen en direcciones opuestas, y salen por extremos opuestos. De manera alternativa, los fluidos se pueden mover en flujo cruzado (perpendicular entre sí) como se muestra en la Figura 27 mediante los intercambiadores tubulares con aletas y sin aletas.

Figura 26. Intercambiadores de Calor de Tubos Concéntricos



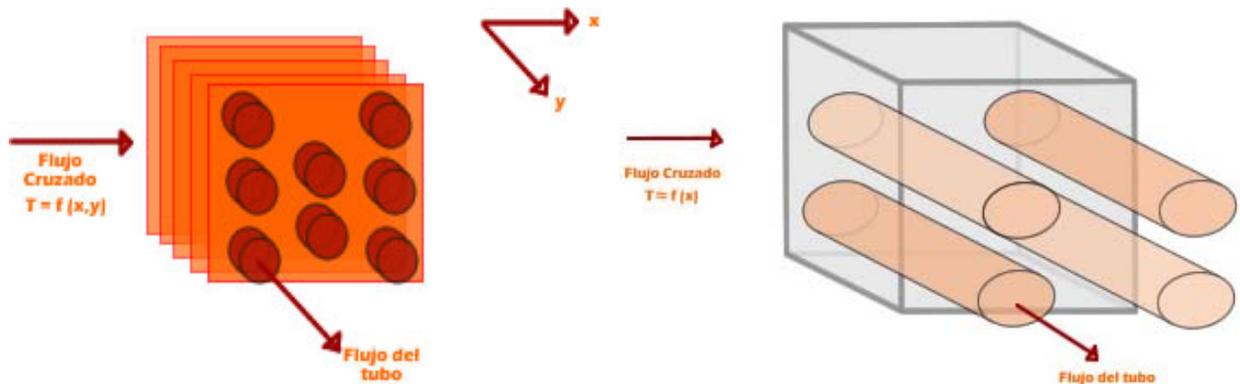
Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

¹¹ INCROPERA, Frank y DE WITT, David. Fundamentos de Transferencia de Calor. Cuarta Edición. México : Prentice Hall, 2002. p 582 -584.

Las dos configuraciones difieren según el fluido que se mueve sobre los tubos de mezclado o no mezclado. En la Figura 27a, se dice que el fluido no está mezclado porque las aletas impiden el movimiento en una dirección (**y**) que es transversal a la dirección del flujo principal (**x**). En este caso la temperatura del fluido varía con x, y .

Por el contrario, para el conjunto de tubos sin aletas de la Figura 27b, es posible el movimiento del fluido en la dirección transversal, que en consecuencia es mezclado, y las variaciones de temperatura se producen, en principio, en la dirección del flujo principal. En el intercambiador con aletas, dado que el fluido del tubo no es mezclado, ambos fluidos están sin mezclar mientras que en el intercambiador sin aletas un fluido está mezclado y el otro sin mezclar.

Figura 27. Intercambiadores de Calor de Flujo Cruzado

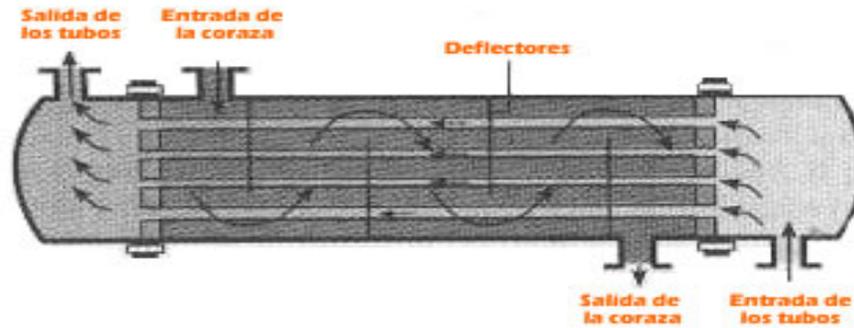


- a. Con aletas y ambos fluidos sin mezclar b. Sin aletas con un fluido mezclado y el otro sin mezclar

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Las formas específicas difieren de acuerdo con el número de pasos de tubos y coraza, y la forma más simple, que implica un solo paso por tubos y coraza, se ilustra en la siguiente Figura 28.

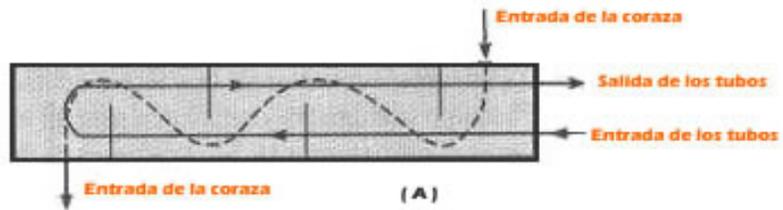
Figura 28. Intercambiadores de Calor de Tubos y Coraza de un Paso



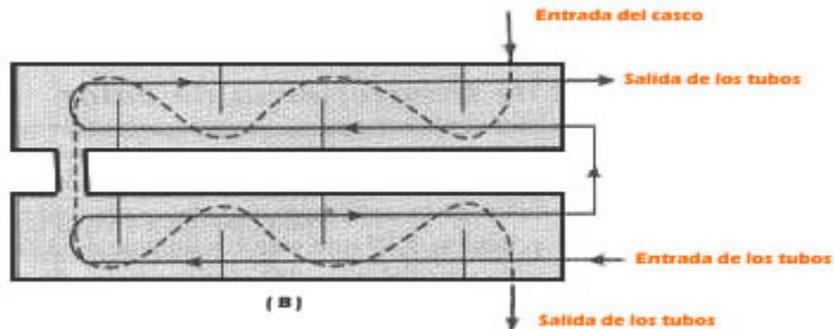
Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

Normalmente se instalan deflectores para aumentar el coeficiente de convección del fluido del lado de la coraza al inducir turbulencia y una componente de la velocidad de flujo cruzado. En la Figura 29, se ilustran intercambiadores de calor de tubos y coraza con varios pasos.

Figura 29. Intercambiadores de Calor de Tubos y Coraza



a. Un paso por la coraza y dos por los tubos



b. Dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos.

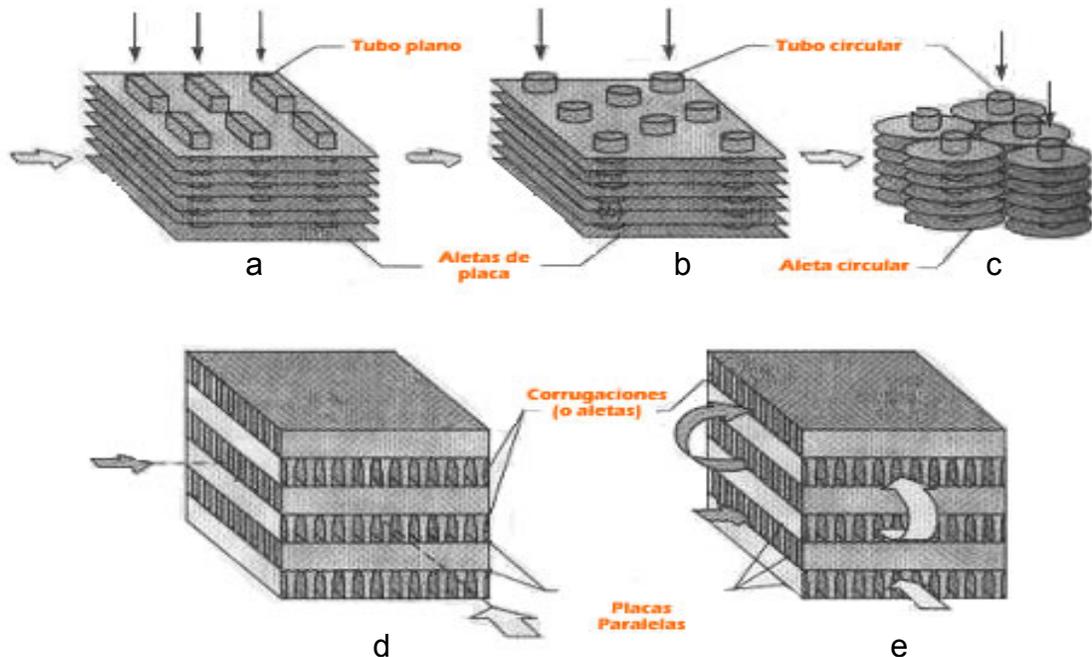
Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor.

Una clase especial e importante de intercambiadores de calor se usa para conseguir un área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen muy grande ($\geq 700 \frac{m^2}{m^3}$).

Denominados intercambiadores de calor compactos, estos dispositivos tienen complejos arreglos de tubos con aletas o placas y se usan normalmente cuando al menos uno de los fluidos es un gas, y en consecuencia se caracterizan por un coeficiente de convección pequeño. Los tubos pueden ser de planos o circulares, como los de la Figura 30, y las aletas de placa o circular.

Los intercambiadores de calor de placas paralelas pueden ser con aletas y se pueden usar en modos de operación de un solo paso o multipaso. Los pasos asociados con los intercambiadores de calor compactos normalmente son pequeños ($D_h \leq 5mm$), y el flujo es por lo general laminar.

Figura 30. Cubiertas de Intercambiadores de Calor Compactos



Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

Tabla 3. Cubiertas de Intercambiadores de Calor Compactos

a	Tubo con aletas (tubos planos)
b	Tubo con aletas (tubos circulares)
c	Tubo con aletas (tubos circulares, aletas circulares)
d	Aleta de placa (un solo paso)
e	Aleta de placa (multipaso)

Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 REVISIÓN DE CONTENIDOS

Elaboración de un análisis bibliográfico, metodológico y cuantitativo que proporcionó la determinación de las prácticas más relevantes en torno a las competencias de formación en las cuales se deseaba profundizar en los diferentes cursos de la línea de Termofluidos.

De igual forma se implementó un sistema de búsqueda especializado de información a partir de bases de datos bibliográficas y digitales, como EBSCO – PROQUEST – UNIRED, recursos que están a la disposición de la comunidad estudiantil universitaria de la UNAB.

6.2 DETERMINACIÓN DE LOS PROGRAMAS

Se realizó la selección de los programas de cómputo especializados con base en las necesidades y requerimientos de los diferentes módulos a desarrollar. En esta etapa del trabajo se analizó una serie de programas relacionados con la simulación de procesos termofluidicos, con la finalidad de determinar cual sería el mejor programa para implementar en cada módulo.

6.3 DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS UTILIZADOS

6.3.1 Matlab. Es un programa de cómputo especializado para el análisis y desarrollo de cálculos numéricos y el tratamiento de datos, basado en la modelación y simulación de sistemas mediante la implementación de vectores y matrices en la programación de sus resultados y soluciones. Se caracteriza por proveer al usuario diversas herramientas y utilidades que permitan aplicaciones en

diferentes campos del conocimiento mediante la funcionalidad e interrelación de sus componentes.

Matlab, proporciona soluciones para el procesamiento de señales e imágenes, diseño de sistemas de control, ingeniería, investigación, análisis y manipulación (escalación, interpolación, filtrado) de toda clase de datos, desde su adquisición hasta su salida y optimización.

6.3.2 Ansys. Es un programa de cómputo especializado que diseña, desarrolla, comercializa y realiza el soporte de las soluciones que ofrece a sus usuarios para la simulación de todo el ciclo de desarrollo del producto. La herramienta simula, de forma realista y eficiente, tanto las condiciones de trabajo del diseño propuesto como el propio proceso de fabricación, cubriendo de esta forma varios tópicos del sector industrial.

Ansys, colabora con sus usuarios en la consecución e implementación de productos innovadores y de mayor calidad, que necesitan menos prototipos y ensayos para salir al mercado, hechos que representan beneficios en reducción del tiempo empleado en desarrollos y en inversión.

Por otra parte, permite la generación de sinergias entre las distintas tecnologías necesarias para el desarrollo de un producto sin abandonar una única plataforma. Su nivel de integración utiliza desde los sistemas CAD más avanzados del mercado, con la posibilidad de transferencia de información bidireccional y asociativa enfocados en la gestión y aseguramiento de la documentación.

Se pueden desarrollar de esta manera las denominadas “aplicaciones verticales” o adaptaciones del programa a las necesidades específicas de cada usuario. Adaptaciones que van desde la simple estandarización de la metodología de cálculo o la generación automática de informes normalizados, hasta la

implementación de herramientas altamente especializadas y adaptadas e un determinado sector industrial.

6.3.3 Hysys. Las demandas crecientes por parte de las industrias en torno a los procesos productivos requieren la implementación de programas de cómputo especializados que proporcionen soluciones integrales y óptimas, razones por las cuales la organización HYPROTECH desarrolló el programa HYSYS enfocado a determinar, estudiar y analizar fenómenos y procesos presentes en los diferentes campos de acción del sector industrial.

A partir de las herramientas de modelado y simulación de este programa es posible determinar parámetros, variables y condiciones en las operaciones de procesos complejos, mediante interfases gráficas claras y objetivas que presentan resultados en torno a modelos topológicos, propiedades termodinámicas y soluciones matemáticas.

Los procesos modelados requieren paquetes computacionales que permitan obtener la mejor información adicional en torno de las características del proceso, disponibilidad de la información y del modelo empleado con la finalidad de retroalimentar el proceso

Un ambiente de simulación integrado, presente en el modelo del proceso a analizar trae consigo las siguientes ventajas para el usuario:

- Acceso y gestión de la información.
- Representación de las aplicaciones presentes en los modelos termodinámicos empleados.
- Selección de las aplicaciones modeladas, posibilitando al usuario la comprensión del proceso efectuado y la elección de la aplicación.

6.3.4 Cyclepad. Software especializado en el modelado y simulación de procesos termodinámicos que se caracterizan por permitir al usuario acceder en forma fácil y gratuita a su contenido e instalación.

Este programa se especializa en ciclos termodinámicos mediante la aplicación de herramientas en torno a plantas de potencia, refrigeradores y sistemas de propulsión en planta.

6.4 DISEÑO DE LAS PRÁCTICAS

A partir de la comprensión de los principales componentes y funciones de los programas de cómputo seleccionados, necesarios para el desarrollo de cada módulo, se inicia la etapa de desarrollo del trabajo mediante el diseño de los diferentes módulos prácticos basado en las temáticas seleccionadas, tarea que representó gran esfuerzo y trabajo debido a la complejidad y funcionalidad de los programas de cómputo.

6.5 IMPLEMENTACIÓN

En esta fase, se aplicaron los modelos prácticos desarrollados mediante la puesta en marcha de cada módulo experimental simulado mediante el programa de cómputo requerido por cada temática seleccionada, con la finalidad de analizar su desempeño y funcionamiento para posteriormente realizar la socialización de los resultados.

6.6 PRUEBAS PILOTO

Esta etapa del trabajo se dividió en dos partes, la primera se enfocó en un acercamiento y presentación de los diferentes programas de cómputo especializados ofrecidos por la Escuela Ciencias Naturales e Ingenierías a la

comunidad estudiantil, y se ejecutó mediante la realización de pruebas de piloto de laboratorio en sesiones académicas de algunos cursos de la línea Termofluidos. Dicha actividad contó con la supervisión y apoyo de docentes de la Facultad de Ingeniería en Energía, especialistas en los temas abordados.

En la segunda parte, se realizó una actividad de socialización y retroalimentación con la participación de estudiantes de la Facultad de Ingeniería en Energía que cursan actualmente los últimos semestres, en torno a la herramienta de cómputo desarrollada. Actividad que permitió establecer un formato de evaluación (ver Anexo E del documento) con el objetivo de analizar la aceptación de los módulos desarrollados como complementos a la línea de conocimiento de los Termofluidos.

6.7 RETROALIMENTACIÓN

A través de la participación de los docentes de las diferentes asignaturas se analizarán los resultados obtenidos en la sesión piloto y se desarrollarán los cambios necesarios para el obtener el óptimo funcionamiento de los módulos implementados.

6.8 ELABORACIÓN MANUAL INTERACTIVO DE USUARIO

La etapa final del trabajo de grado representa la elaboración y desarrollo del manual interactivo de usuario, los cuales son presentados en el CD interactivo adjunto y en los anexos de este documento.

El objetivo principal es ilustrar en forma práctica y didáctica cada uno de los modelos desarrollados e implementados, con el objetivo de proporcionar una herramienta de apoyo en los cursos de la línea de conocimiento de los Termofluidos.

7. PRÁCTICAS PROPUESTAS

En este capítulo se presentan las temáticas seleccionadas en cada uno de los cursos integrados en el trabajo grado, en torno a la línea del conocimiento de Termofluidos, conformada por las asignaturas Termodinámica, Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor.

Se recomienda al lector dirigirse al CD interactivo anexo a este trabajo, en donde se describen en forma detallada las etapas que se deben realizar en cada módulo de simulación desarrollado con un programa determinado de cómputo. Además, podrá conseguir en su contenido los manuales de usuario interactivos y el material de apoyo complementario de los programas utilizados, CYCLEPAD, MATLAB, HYSYS y ANSYS, con el objetivo de proporcionar soporte al usuario cuando lo desee y requiera. También en los anexos del documento podrá encontrar breves descripciones de los programas de cómputo seleccionados en forma de tutoriales.

Cada uno de los módulos ilustrados a continuación contiene la siguiente estructura:

1. Título
2. Generalidades
3. Curso Integrado
4. Objetivos
5. Software Utilizado
6. Descripción del Problema
7. Procedimiento
8. Resultados

7.1 MÓDULO I - CICLOS DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Generalidades: Ciclos Termodinámicos

- Ciclo Ideal de Refrigeración por Compresión de Vapor
- Sistemas de Refrigeración en Cascadas
- Refrigeración por Compresión de Múltiples Etapas

Curso: Termodinámica

Objetivos

1. Analizar y simular el comportamiento de los ciclos termodinámicos presentes en sistemas de refrigeración.
2. Representar esquemáticamente los procesos efectuados en sistemas de refrigeración a partir de diagramas y gráficos ilustrativos.
3. Determinar el rendimiento y la eficiencia de los ciclos de refrigeración seleccionados y descritos en el módulo.

Software Utilizado: CYCLEPAD

Descripción del Problema

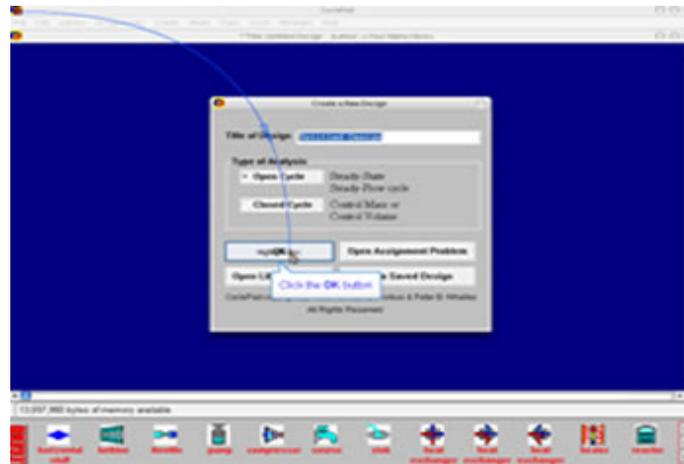
Analizar el comportamiento de cada uno de los ciclos de refrigeración seleccionados en torno a la determinación de sus condiciones de operación y sus rendimientos.

Procedimiento

- **Etapa I:** El usuario deberá ejecutar el programa de cómputo seleccionado para esta experiencia, CYCLEPAD; posteriormente deberá seleccionar la forma de análisis, en este caso, ciclo abierto para efectuar una simulación de este tipo.

En la Figura 31 se presenta la interfase gráfica inicial del programa CYCLEPAD.

Figura 31. Interfase Cyclepad



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **Etapa II:** En esta fase, se realizará la selección e implementación de los principales elementos del ciclo de refrigeración a simular. Este proceso es conocido como modo de construcción. La Figura 32 presenta el entorno gráfico que el usuario obtendrá a partir de la ejecución de esta fase.

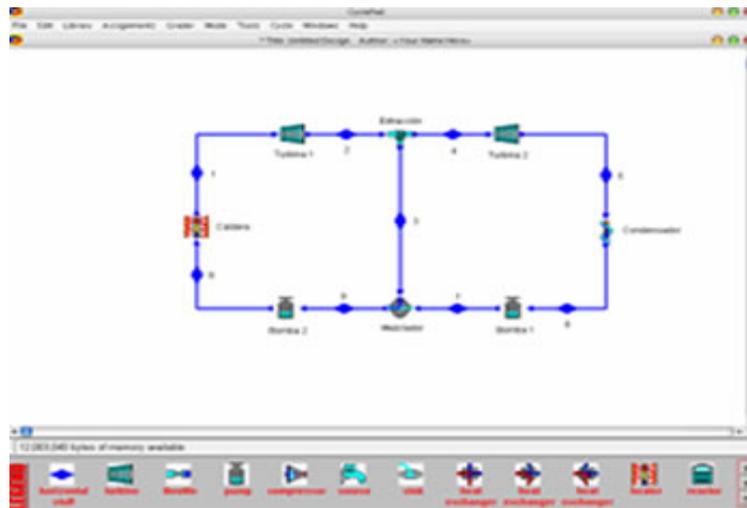
Figura 32. Selección e Implementación de los Elementos



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **Etapa III:** Modo de análisis, etapa de la experiencia en la cual se establecen las condiciones de operación de cada estado del sistema que se desea simular, es decir, la selección de las sustancias, propiedades generales de los equipos y del ciclo. Esta fase se caracteriza por incluir en su entorno gráfico un fondo blanco y lazos conectores de color azul, como se ilustra en la Figura 33.

Figura 33. Interfase Gráfica del Modo de Análisis



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **Etapa IV:** Visualización y análisis de resultados. En esta fase, el usuario podrá determinar las principales propiedades del ciclo seleccionado, examinar y comparar las características más relevantes en torno sus estados, elementos y componentes del ciclo.

A continuación se presentan formatos de los resultados obtenidos en el desarrollo del módulo, los cuales permitirán el análisis y comprensión del ciclo seleccionado mediante la utilización de diferentes sustancias, con la finalidad de determinar la forma como influyen en la eficiencia del ciclo modelado. Además, se recomienda utilizar la función Sensitivity localizada en el menú de herramientas para caracterizar los parámetros dependientes e independientes que se deseen analizar.

Resultados

Tabla 4. Resultados Obtenidos en Cada Estado

Ciclos de Refrigeración					
Tipo					
	Sustancia	Fase	T [K]	P [kPa]	m [Kg/s]
Estado 1					
Estado 2					
Estado 3					
Estado 4					
Estado ...n					

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 5. Resultados Obtenidos en los Equipos

Equipo	Estado	Calor Específico [kJ / Kg]	Modelado	Flujo másico [Kg/s]	T[C]
Caldera					
Condensador					
Compresor					
Turbina					

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 6. Resultados de las Propiedades del Ciclo de Refrigeración

Modelado	
Eficiencia térmica de Carnot [%]	
Eficiencia Térmica [%]	
Temperatura máxima [C]	
Presión máxima [kPa]	
Potencia neta [Kw]	

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

7.2 MÓDULO II - CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADOS

Generalidades: Ciclos Termodinámicos

- Ciclo Rankine Ideal Simple
- Ciclo Rankine Ideal con Recalentamiento
- Ciclo Rankine Ideal Regenerativo
- Calentadores Cerrados de Agua de Alimentación
- Ciclo Combinado

Curso: Termodinámica

Objetivos

1. Analizar y caracterizar el funcionamiento de los ciclos termodinámicos presentes en sistemas de potencia de vapor.
2. Ilustrar los comportamientos generales de los ciclos combinados.
3. Desarrollar diagramas esquemáticos que permitan ilustrar su operación.

Software Utilizado: CYCLEPAD

Descripción del Problema

Analizar el comportamiento de cada uno de los ciclos de potencia de vapor y combinados seleccionados en torno a la determinación de sus condiciones de operación y rendimiento.

Procedimiento

El procedimiento empleado en la simulación de los diferentes tipos de ciclos termodinámicos es muy similar, razón por la cual se enunciarán las etapas necesarias para el desarrollo del módulo. Se recomienda al lector dirigirse al CD interactivo anexo, en donde podrá encontrar los archivos ejecutables, tutoriales y fuentes que le permitirán profundizar este tema.

- **Etapa I:** Ejecución del programa y caracterización de componentes.
- **Etapa II:** Modo de construcción.
- **Etapa III:** Modo de análisis.
- **Etapa IV:** Visualización y análisis de resultados.

Resultados

A continuación se presentan formatos de los resultados obtenidos en el desarrollo del módulo, los cuales permitirán el análisis y comprensión del ciclo seleccionado.

Tabla 7. Resultados Obtenidos en Cada Estado

Ciclos de Potencia de Vapor y Combinados					
Tipo					
	Sustancia	Fase	T [K]	P [kPa]	m [Kg/s]
Estado 1					
Estado 2					
Estado 3					
Estado 4					
Estado...n					

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 8. Resultados Obtenidos en los Equipos

Equipo	Estado	Calor Específico [kJ / Kg]	Modelado	Flujo másico [Kg/s]	T[C]
Caldera					
Condensador					
Turbina					
Bomba					

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 9. Resultados de las Propiedades del Ciclo de Vapor

Modelado	
Eficiencia térmica de Carnot	
Eficiencia Térmica	
Temperatura máxima [C]	
Temperatura mínima [C]	
Presión máxima [kPa]	
Presión mínima [kPa]	
Potencia neta [Kw]	
Flujo de Calor, entrada [Kw]	
Flujo de Calor, salida [Kw]	
Costo de la Energía US\$/día	

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

El usuario podrá realizar la simulación utilizando diferentes sustancias, con la finalidad de determinar la forma como ellas influyen en la eficiencia del ciclo modelado. Además, se recomienda utilizar la función Sensitivity localizada en el menú de herramientas para caracterizar los parámetros dependientes e independientes que se deseen analizar.

7.3 MÓDULO III – CICLOS DE POTENCIA DE GAS

Generalidades: Ciclos Termodinámicos

- Ciclo Otto
- Ciclo Diesel
- Ciclo Brayton Ideal

Curso: Termodinámica

Objetivos

1. Ilustrar las condiciones básicas presentes en el análisis de ciclos de potencia de gas.
2. Analizar los estados termodinámicos presentes en los ciclos de potencia seleccionados y determinar sus condiciones de operación y funcionamiento.
3. Desarrollar diagramas esquemáticos que permitan ilustrar su operación.

Software Utilizado: CYCLEPAD

Descripción del Problema

Analizar el comportamiento de cada uno de los ciclos de potencia de gas seleccionados en torno a la determinación de sus condiciones de operación y rendimiento.

Procedimiento

El procedimiento empleado en la simulación de los diferentes tipos de ciclos termodinámicos es muy similar, razón por la cual se enunciarán las etapas necesarias para el desarrollo del módulo. Se recomienda al lector dirigirse al CD

interactivo anexo, en donde podrá encontrar los archivos ejecutables, tutoriales y fuentes que le permitirán profundizar este tema.

- **Etapa I:** Ejecución del programa y caracterización de componentes
- **Etapa II:** Modo de construcción
- **Etapa III:** Modo de análisis
- **Etapa IV:** Visualización y análisis de resultados

Resultados

A continuación se presentan formatos de los resultados obtenidos en el desarrollo del módulo, los cuales permitirán el análisis y comprensión del ciclo seleccionado.

Tabla 10. Resultados Obtenidos en Cada Estado

Ciclos de Potencia de Gas					
Tipo					
	Sustancia	Fase	T [K]	P [kPa]	m [Kg/s]
Estado 1					
Estado 2					
Estado 3					
Estado 4					
Estado ...n					

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 11. Resultados Obtenidos en los Equipos

Equipo	Estado	Calor Específico [kJ / Kg]	Modelado	Flujo másico [Kg/s]	T[C]
Caldera					
Condensador					
Compresor					
Turbina					

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 12. Resultados de las Propiedades del Ciclo de Gas

Modelado	
Eficiencia térmica de Carnot	
Eficiencia Térmica	
Temperatura máxima [C]	
Temperatura mínima [C]	
Presión máxima [kPa]	
Presión mínima [KPa]	
Potencia neta [Kw]	
Flujo de Calor, entrada [Kw]	
Flujo de Calor, salida [Kw]	
Costo de la Energía US\$/día	
Flujo de Calor, entrada [Kw]	

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Posterior al desarrollo de las tablas, se recomienda utilizar la función Sensitivity localizada en el menú de herramientas para caracterizar los parámetros dependientes e independientes que se deseen analizar. Además, utilizar diferentes tipos de sustancias con la finalidad de analizar el rendimiento y eficiencia del ciclo simulado.

7.4 MÓDULO IV – MEDICIÓN DE FLUJO

Generalidades: Medidores de presión diferencial

- Medidor de Orificio
- Medidor Vénturi
- Tobera de Flujo

Curso: Mecánica de Fluidos

Objetivos

1. Describir propiedades y condiciones de operación presentes en sistemas de medición flujo.
2. Especificar el comportamiento de los principales instrumentos de medición.
3. Analizar y definir el rendimiento de los componentes seleccionados a partir de la simulación de procesos basados en medición de presión diferencial.

Software Utilizado: ANSYS

Descripción del Problema

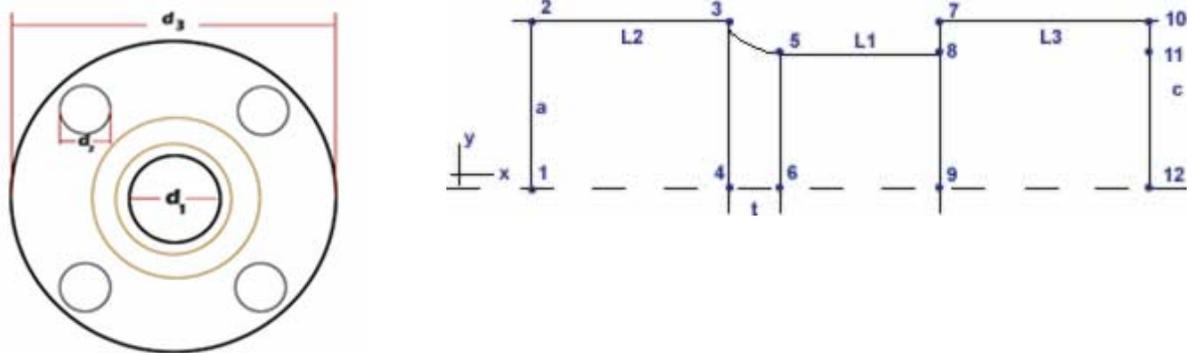
Construir los patrones de flujos de corrientes presentes en los sistemas de medición diferencial, con la finalidad de analizar líneas de flujo y el comportamiento de los fenómenos de turbulencia implícitos en el transporte de fluidos.

Procedimiento

La metodología empleada se caracteriza por la determinación de las propiedades y dimensiones de los instrumentos de medición seleccionados, Tubo Vénturi, Tobera y Platina Orificio. Es importante resaltar que los datos fueron obtenidos a

través de las pruebas efectuadas con la herramienta de calibración marca L & W, los resultados obtenidos se ilustran en el Tabla 13. Estos elementos de medición se encuentran ubicados en el Laboratorio Planta Piloto, recurso de la Escuela de Ciencias Naturales e Ingeniería.

Figura 34. Dimensiones Establecidas en los Instrumentos de Medición



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 13. Resultados de los Instrumentos de Medición

Tubo Vénturi	Platina Orificio	Tobera	Datos
$d_{1\text{ INT}} = 1.33\text{ cm}$ $d_{1\text{ EXT}} = 2.62\text{ cm}$	$d_1 = 1.3\text{ cm}$	$d_{1\text{ INT}} = 2.00\text{ cm}$ $d_{1\text{ EXT}} = 2.09\text{ cm}$	$L_1 = 5*a$ $L_2 = 1E-2$ $L_3 = 10*a$
$d_2 = 1.59\text{ cm}$	$d_2 = 1.33\text{ cm}$	$d_2 = 1.6\text{ cm}$	$c = 1\text{ E-}2$
$d_3 = 10.91\text{ cm}$	$d_3 = 1.33\text{ cm}$	$d_3 = 10.82\text{ cm}$	$t = 0.6E-2$
Profundidad = 4.71 c.m	Profundidad = 0.32 cm	Profundidad = 1.59 cm	$a = 1.3125\text{ E-}2$

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

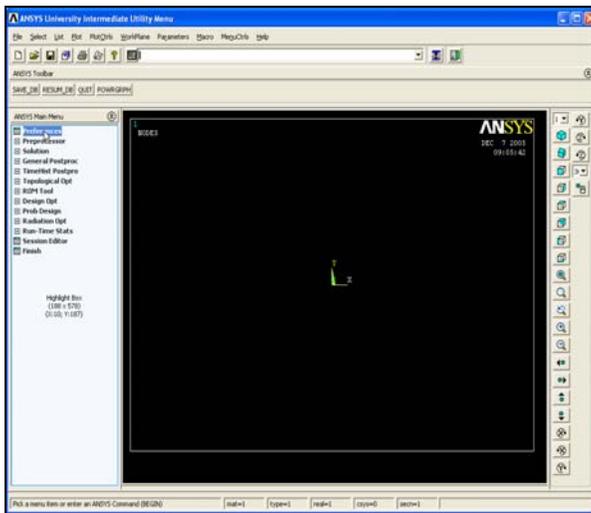
A continuación se describen las etapas necesarias para efectuar satisfactoriamente el módulo planteado.

- **Etapla I:** Selección del paquete de cómputo seleccionado. En esta fase el usuario deberá ejecutar la aplicación del programa de cómputo ANSYS y abrir el archivo fuente que desea analizar. Es importante resaltar que este

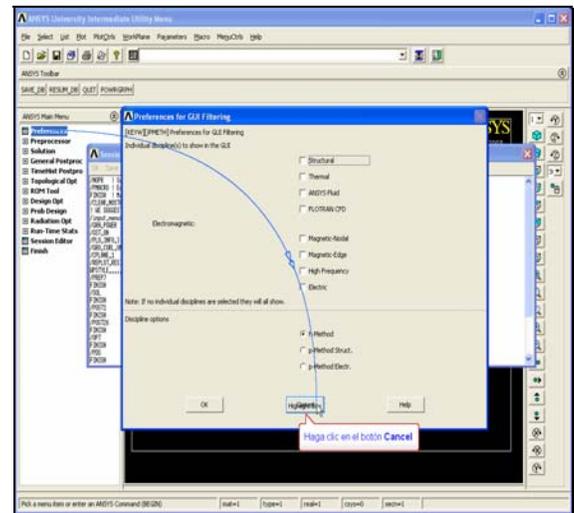
módulo se caracteriza por el análisis de los instrumentos de medida seleccionados, motivo por el cual se desarrolló un archivo fuente que permita cumplir este objetivo. El lector puede remitirse al CD interactivo de las herramientas desarrolladas, en donde encontrará un tutorial paso a paso de las etapas necesarias para efectuar satisfactoriamente el módulo.

En la Figura 35, se ilustra la interfase gráfica inicial y entorno para determinar el modo de utilización del programa ANSYS.

Figura 35. Generalidades del Programa ANSYS



Interfase ANSYS



Determinación del modo de utilización

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

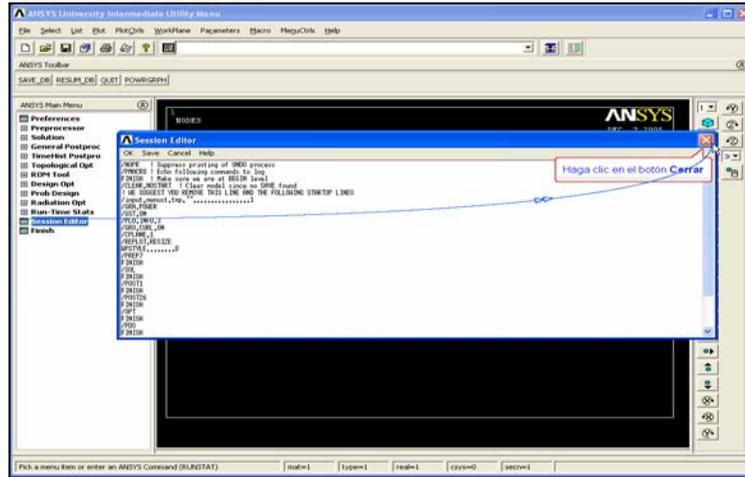
- **Etap II: Visualización y análisis de los resultados.**

Resultados

En esta fase final de la experiencia, se recomienda consultar el manual de usuario ANSYS[♦] en donde se ilustra la metodología en forma detallada en torno a la visualización e interpretación de resultados.

[♦] Consultar manual de usuario ANSYS en los anexos de la investigación.

Figura 36. Finalización de la Simulación



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 14. Resultados Obtenidos en el Módulo IV

	P[kPa]	V[L]	T[C]	m[kg/s]
Medidor de orificio				
Medidor vénturi				
Tobera de flujo				

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

A partir del desarrollo de las fases anteriores, el usuario podrá determinar el coeficiente de contracción del equipo utilizado en la medición, basados en el ΔP obtenido en la simulación y variando la variable del caudal y determinado velocidades y el número de Reynolds.

7.5 MÓDULO V – CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO ESTABLE

Generalidades:

Conducción de Calor en Estado Estable – Bidimensional – Sin Calor Generado

Curso: Transferencia de Calor

Objetivos

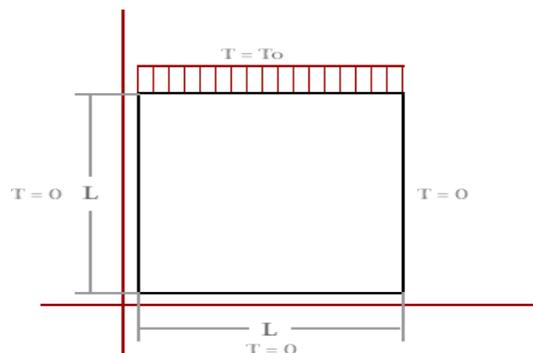
1. Determinar e interpretar las condiciones de frontera implícitas en la simulación de sistemas en torno a la conducción de calor en estado estable.
2. Analizar los principales conceptos y metodologías en torno a la simulación y caracterización de procesos de conducción de calor en estado estable.
3. Desarrollar diagramas y gráficos esquemáticos que permitan interpretar y comprender los fenómenos presentes en este tipo de situaciones.
4. Comparar el método numérico contra el método de separación de variables.

Software Utilizado: MATLAB 6.5

Descripción del Problema

Determinar la conducción de calor en estado estable, bidimensional y sin calor generado en una superficie sólida a partir del análisis de las condiciones de frontera.

Figura 37. Descripción del Problema de Conducción

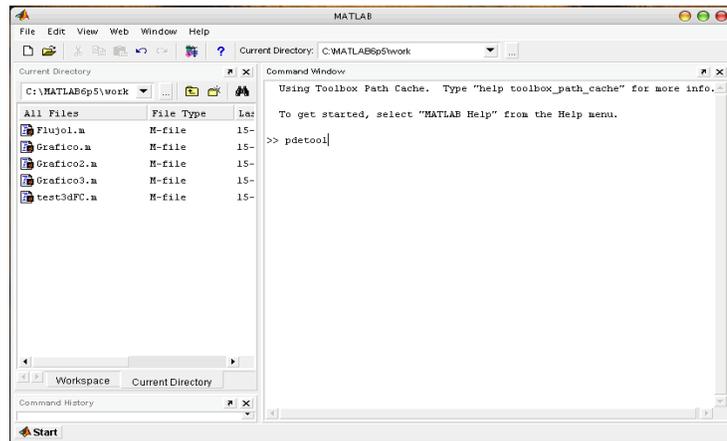


Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Procedimiento:

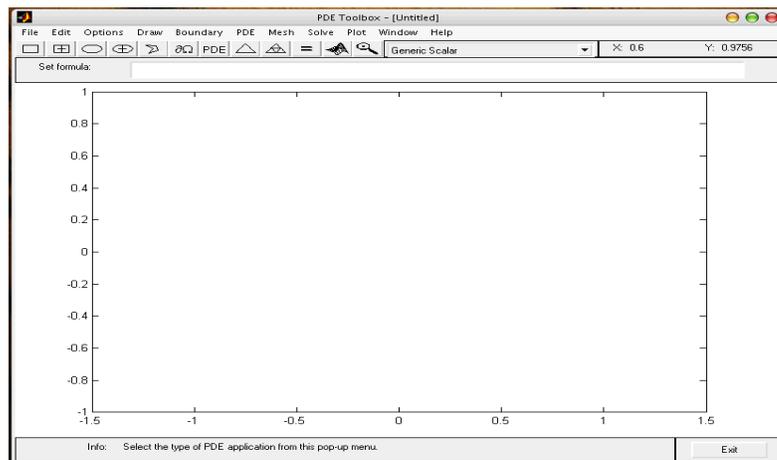
- **Etapa I:** El usuario deberá ejecutar el programa de cómputo seleccionado para esta experiencia, MATLAB v. 6.5; en la Figura 38 se presenta la interfase gráfica inicial para este programa, posteriormente el usuario tendrá que introducir el comando **PDETOOL** con el objetivo de establecer la aplicación e interfase como se ilustra en la Figura 39 que le permitirá simular las condiciones de frontera en una superficie determinada.

Figura 38. Interfase del Programa MATLAB



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

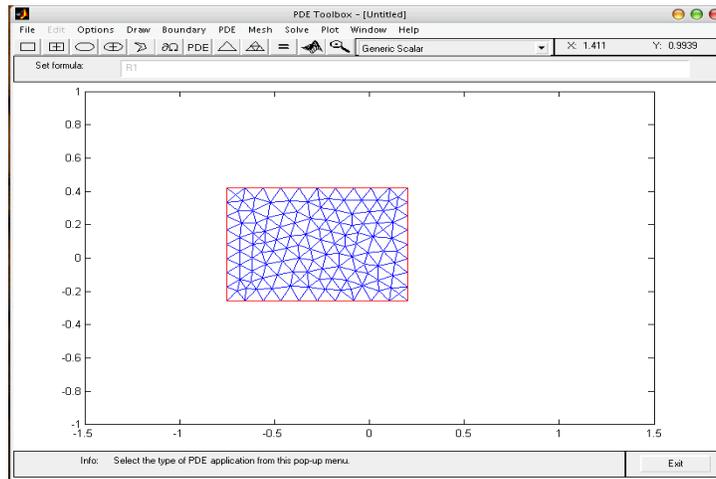
Figura 39. Herramienta PDE Toolbox



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **Etapa II:** En esta fase del módulo se establecerá la superficie a estudiar mediante la elección de la herramienta para definir la geometría, posteriormente se realizará la malla en la región seleccionada.

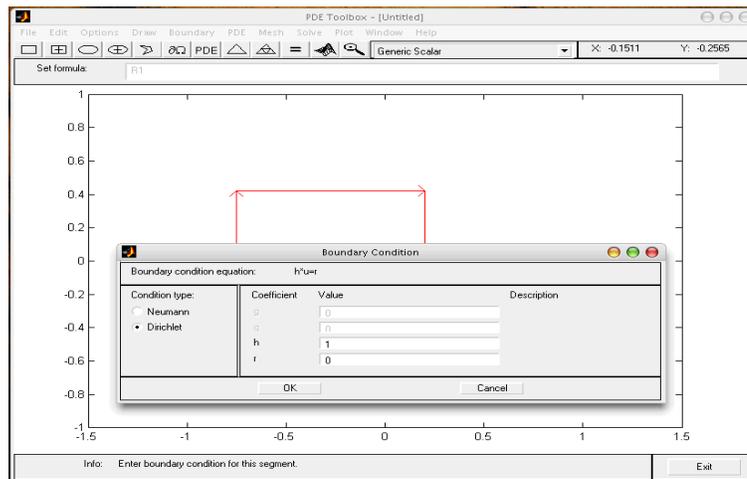
Figura 40. Diagrama Malla de Superficie



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **Etapa III:** Representa la fase de la experiencia en la cual el usuario deberá introducir los valores de las condiciones de frontera que desea analizar en el desarrollo de la simulación.

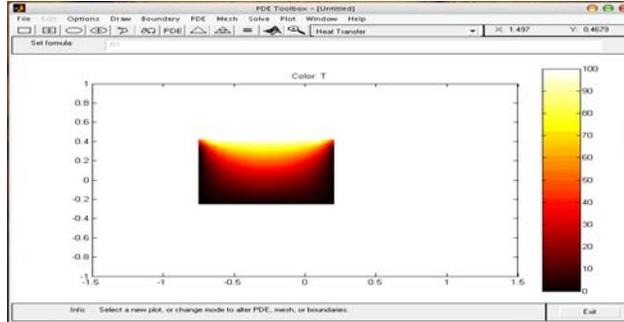
Figura 41. Selección de las Condiciones de Frontera



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **Etapla IV:** Visualización y análisis de los resultados.

Figura 42. Interfase del Perfil de Temperatura



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Resultados

Posteriormente al desarrollo de las etapas anteriores, se efectuará la comparación entre el método numérico y el método de separación de variables[♦], mediante el análisis de la siguiente expresión:

$$\theta(x, y) = \frac{2}{\Pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} + 1}{n} \text{sen} \frac{n\pi x}{L} \frac{\text{senh}(n\pi y / L)}{\text{senh}(n\pi W / L)} \quad (52)$$

La ecuación 52 es una serie convergente, en la que el valor de θ se calcula para cualquier x e y . Los resultados representativos se muestran en forma de isoterma para un esquema de placa rectangular. La temperatura T , que corresponde a un valor de θ , se puede obtener mediante la expresión:

$$\theta = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \quad (53)$$

Finalmente, el usuario podrá construir una tabla de datos que le permita analizar cada uno de los métodos representados en torno a la conducción bidimensional de calor.

[♦] La guía del módulo 'Conducción de Calor en Estado Estable' ubicada en el CD interactivo presenta la fundamentación teórica del método de separación de variables.

7.6 MÓDULO VI - ALETAS

Generalidades: Aleta Recta de Sección Transversal

Curso: Transferencia de Calor

Objetivos

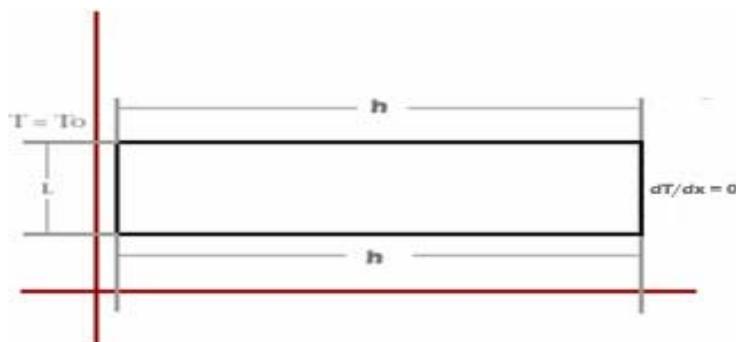
1. Establecer las condiciones de frontera, las propiedades térmicas y la geométrica que permitan simular el comportamiento en forma unidimensional de una aleta.
2. Analizar las propiedades de los principales materiales presentes en los desarrollo de superficies extendidas.
3. Determinar el perfil de temperatura de la aleta.
4. Presentar el funcionamiento del componente PDE TOOL, herramienta complementaria del paquete de simulación MATLAB.

Software Utilizado: MATLAB 6.5

Descripción del Problema

Determinar bajo qué condiciones geométricas, propiedades térmicas y condiciones de frontera una aleta se comporta en forma unidimensional.

Figura 43. Descripción del Problema de Aletas



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Procedimiento

- **Etapa I:** Selección del paquete de cómputo.
- **Etapa II:** Determinación de la geometría y enmallado.
- **Etapa III:** Selección del material

A partir de las tablas de las propiedades de los materiales presentadas, Tablas 15 y 16, escoja el material de su interés y determine el número de Biot, mediante la siguiente expresión:

$$Bi = \frac{hLc}{k} \quad (54)$$

La temperatura de los materiales presentados es 300 K

- **Etapa IV:** Condiciones de frontera y operación.

Determinación de los valores en torno a la simulación de condiciones de operación a analizar a partir del desarrollo del módulo.

- **Etapa V:** Visualización y análisis de los resultados.

En esta fase, el usuario podrá establecer observaciones y conclusiones en torno a los métodos propuestos y desarrollados durante la experiencia.

Tabla 15. Propiedades de los Materiales Malos Conductores

Material	Conductividad Térmica k [W/m.K]
Ladrillo común	0.72
Corcho	0.039
Vidrio, Pirex	1.4
Madera prensada	0.094
Teja acústica	0.058

Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

Tabla 16. Propiedades de los Materiales Buenos Conductores

Material	Conductividad Térmica k [W/m.K]
Acero puro	80.2
Aceros al carbón AISI 1010	63.9
Cobre	401
Estaño	66.6
Germanio	59.9

Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

Resultados

Por último, el usuario deberá construir una tabla de datos que le permita analizar cada uno de los métodos representados en torno a la conducción en estado transitorio a través de una superficie extendida que se comporta en forma unidimensional.

7.7 MÓDULO VII – INTERCAMBIADOR DE CALOR

Generalidades: Selección de Intercambiador de Calor

Curso: Transferencia de Calor

Objetivos

1. Ilustrar el funcionamiento de un intercambiador de calor de casco y tubos.
2. Determinar las condiciones de operación óptimas presentes en un proceso de intercambio de calor.
3. Desarrollar gráficas y diagramas esquemáticos que permitan analizar su operación.

Software Utilizado: HYSYS 3.1

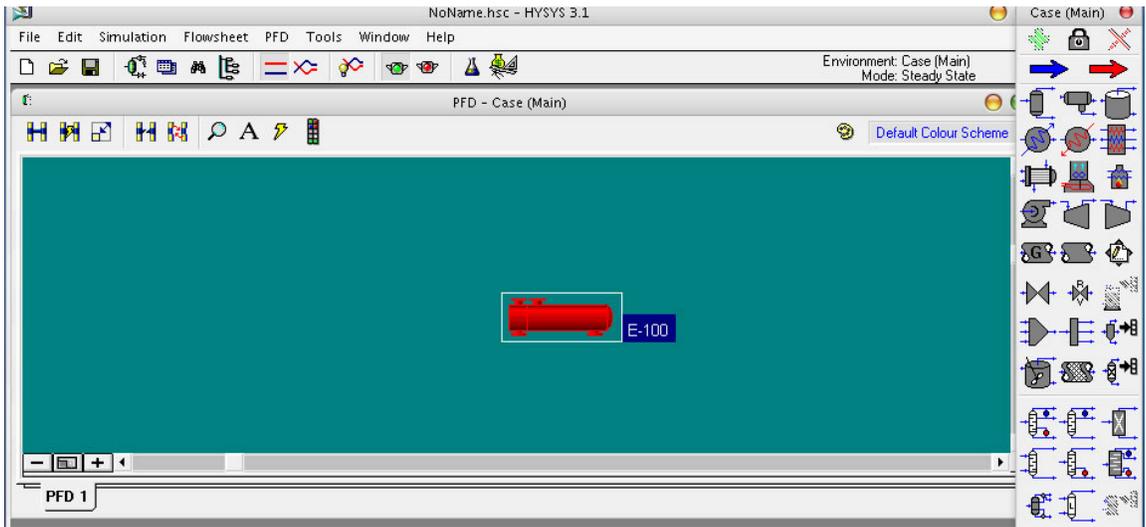
Descripción del Problema

Analizar el funcionamiento de un intercambiador de calor a partir de la simulación de condiciones de operación presentes en un proceso industrial, con la finalidad de seleccionar el tipo más adecuado.

Procedimiento

- **Etapa I:** En esta fase, se realizará la selección del paquete termodinámico, los compuestos y componentes que se desean analizar mediante el módulo de simulación; y, a su vez se elegirá el tipo de intercambiador de calor.
- **Etapa II:** Examinar y definir condiciones de operación y propiedades del intercambiador de calor seleccionado, que permitan establecer el medio adecuado para simular su proceso de funcionamiento.

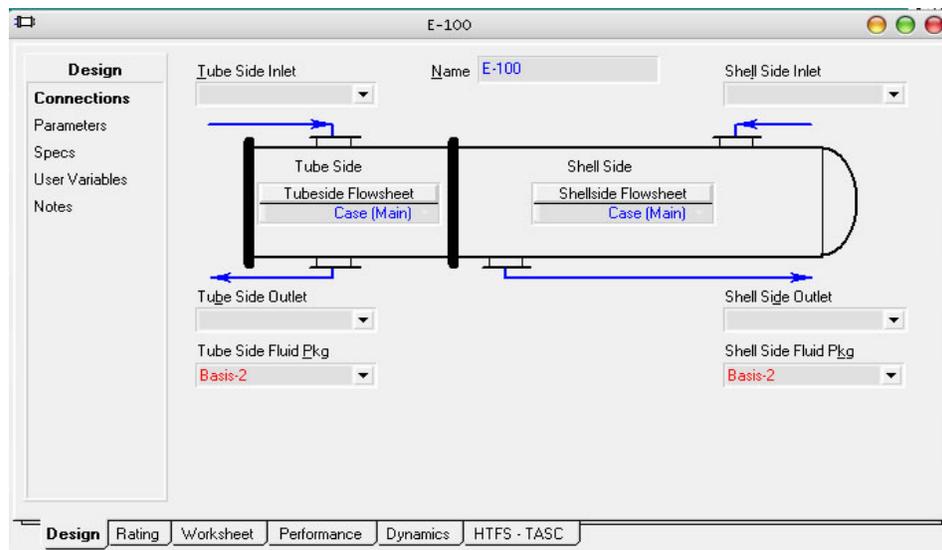
Figura 44. Selección del Intercambiador de Calor



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Por otra parte, se deberá definir el fluido o fluidos presentes en la simulación. Para ejecutar esta tarea se recomienda consultar el manual de usuario HYSYS presentado en el CD interactivo anexo al trabajo.

Figura 45. Caracterización del Intercambiador de Calor

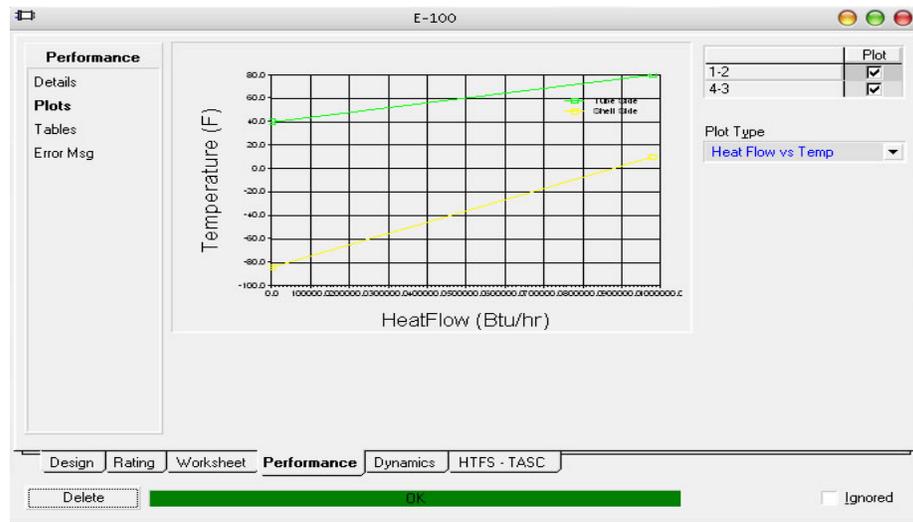


Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **Etapa III:** Visualización y análisis de los resultados

Construcción de diagramas esquemáticos y tablas de datos que involucran las propiedades y condiciones que describen el comportamiento y funcionamiento del intercambiador de calor.

Figura 46. Diagrama de Temperatura v.s Flujo de Calor



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Resultados

Tabla 17. Propiedades del Intercambiador de Calor

Fase			
Temperaturas			
Presión		Calor perdido	
Flujo molar		UA	
Flujo másico		LMTD	
Flujo de Calor			

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

7.8 MÓDULO VIII – ESTADO TRANSITORIO

Generalidades: Conducción en Estado Transitorio

Curso: Transferencia de Calor

Objetivos

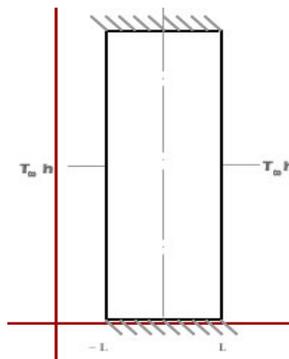
1. Determinar las diferencias entre los parámetros concentrados y distribuidos implícitos en la simulación de superficies y cuerpos en estado transitorio.
2. Ilustrar la distribución de temperaturas transitorias para diferentes números de Biot en una pared plana.
3. Realizar una simulación del sistema a partir del análisis de las condiciones de operación y propiedades que permitan establecer soluciones gráficas y numéricas.
4. Comparar la solución numérica contra la solución exacta de la series de Fourier.

Software Utilizado: MATLAB 6.5

Descripción del Problema

Construir y modelar sistemas en estado transitorio a partir del análisis de parámetros, condiciones de frontera y materiales, que permitan establecer comparaciones gráficas y numéricas.

Figura 47. Descripción del Problema de Estado Transitorio



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Procedimiento

- **Etapa I:** Selección del paquete de cómputo seleccionado.
- **Etapa II:** Determinación de la geometría y enmallado.
- **Etapa III:** Selección del material.

A partir de la caracterización de las principales propiedades termofísicas de materiales comunes presentes en la siguiente Tabla, seleccione cinco materiales, determina un número de Fourier que le permita variar las condiciones de frontera y el número de Biot entre rangos de 0.01 - 20.

Tabla 18. Propiedades Termofísicas de Materiales Comunes

Descripción	T [K]	ρ [Kg/m ³]	k [W/m.K]	Cp [J/Kg.K]
Madera prensada	300	640	0.094	1170
Madera prensada, alta densidad	300	1010	0.15	1380
Ladrillo, común	300	1920	0.72	835
Ladrillo, frente	300	2083	1.3	
Ladrillo de arcilla	478	2645	1.0	960
Ladrillo de cromita	473	3010	2.3	835
Fibra de vidrio, unión orgánica	300	105	0.036	795
Corcho	300	120	0.039	1800
Espuma rígida	300	70	0.026	1045
Vidrio – Pirex	300	2500	1.4	750
Arcilla	300	1460	1.3	880
Carbón, antracita	300	1350	0.26	1260

Fuente: Incropera & De Witt. Fundamentos de Transferencia de Calor

- **Etapa IV:** Condiciones de frontera y operación.

- **Etapa V:** Visualización y análisis de los resultados.

Resultados

Elaboración de la tabla de resultados, que permite al usuario analizar la distribución de Temperatura dentro del sólido presentado.

Tabla 19. Resultados Obtenidos en el Módulo VIII

Estado Transitorio		
Material		
Número de Fourier		
	Numero de Biot	Distribución de Temperatura
	0.01	
	0.02	
	0.03	
	0.04	
	0.05	
	0.06	
	0.07	
	0.08	
	0.09	
	0.10	
	1.0	

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

CONCLUSIONES

A partir de la investigación, se encontraron herramientas computacionales especializadas en la simulación de procesos y operaciones unitarias aplicadas al área de los termofluidos, a través del desarrollo de cada uno de los módulos interactivos.

Producto del contacto con los paquetes de cómputo utilizados, ANSYS – HYSYS – MATLAB – CYCLEPAD, se tuvo la oportunidad de probar y aplicar características, funciones y componentes de cada uno, consolidando un área atractiva en la investigación y desarrollo, para los ingenieros que deseen trabajar en este campo gracias a la versatilidad e interacciones que proporcionan e implementan los paquetes mencionados.

Con el prototipo piloto se realizó una simulación de los módulos propuestos entre los estudiantes, lo cual me permitió interpretar y conocer los conceptos de los usuarios, y a su vez obtener una visión global de los procesos y fenómenos que intervienen a nivel industrial.

A través del desarrollo de los ciclos termodinámicos seleccionados fue posible analizar el comportamiento de cada uno de los ciclos de potencia de vapor y combinados, refrigeración y gas, en torno a la determinación de sus condiciones de operación y rendimiento.

A partir de las aplicaciones desarrolladas en torno a las temáticas de transferencia de calor, fue posible construir y modelar sistemas en estado transitorio a partir del análisis parámetros, condiciones de frontera y materiales, estableciendo comparaciones gráficas y numéricas. Además, determinar la conducción de calor en estado estable, bidimensional y sin calor generado en una superficie sólida a

partir del análisis de las condiciones de frontera. Por otra parte, es posible determinar bajo qué condiciones geométricas, propiedades térmicas y condiciones de frontera, una aleta se comporta en forma unidimensional., analizar el funcionamiento de un intercambiador de calor a partir de la simulación bajo condiciones de operación presentes en un proceso industrial.

En cuanto a las aplicaciones desarrolladas en el área de la mecánica de fluidos, permitieron construir los patrones de flujos de corrientes presentes en los sistemas de medición diferencial, con la finalidad de analizar líneas de flujo y el comportamiento de los fenómenos de turbulencia implícitos en el transporte de fluidos.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para aquellas personas que estén interesadas en trabajar simulación, es importante centrar su atención en el estudio de programas de cómputo especializados en simulación, como ANSYS – HYSYS – MATLAB - CYCLEPAD, los cuales representan una excelente opción para especificar la estructura y funcionamiento de procesos termofluidicos.

Como complemento del trabajo realizado, se pueden desarrollar e implementar aplicaciones en torno a procesos y operaciones unitarias, enfocados a racionalizar y a optimizar el uso y transformación de la energía.

BIBLIOGRAFÍA

LUYBEN, W.L. Simulation and control for chemical engineers. McGrawHill, 1997.

GUASCH, Antoni y HUBBER, Rafael. Técnicas de simulación Automática e Instrumentación. Segunda edición, 1997.

PUIGJANER, Luis. Utilización de simuladores en el desarrollo e implementación de nuevos procesos. Escuela técnica superior de ingenieros industrial de Barcelona, 1998.

CREUS, Antonio. Simulación y Control de procesos en PC. Segunda edición. Barcelona : Marcombo & Boixareu Editores, 1998.

INCROPERA, Frank y DE WITT, David. Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta edición. México : Prentice Hall, 2002.

ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Tomo II. Segunda Edición. México : McGrawHill, 1994.

ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta Edición. México : McGrawHill, 2003.

POTTER, Merle y WIGGERT, David. Mecánica de fluidos. México : Thomson, 2002.

STREETER, Víctor, WYLIE, Benjamín y BEDFORD, Keith. Mecánica de fluidos. Colombia : McGrawHill, 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Tesis y otros trabajos de grado. Quinta actualización. Bogotá: ICONTEC NTC 1486, 2002.

APUNTES Y DESARROLLOS DEL CURSO ELECTIVO EN SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN INDUSTRIALES. Facultad de ingeniería en energía - UNAB. Primer semestre de 2005.

ASPEN TECHNOLOGY. HYPROTECH. Get Stared HYSYS V3.1, 2002.

ASPEN TECHNOLOGY. HYPROTECH. Tutorials & applications HYSYS V3.1, 2002.

Laboratorio de diseño de procesos [en línea]. Colombia: Universidad EAFIT, 2003 [citada en Agosto 15 de 2005] Disponible en Internet: <http://www.eafit.edu.co/laboratoriodiseno.html>

Laboratorio de Diseño de Procesos [en línea]. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2004 [citada en Septiembre 1 de 2005] Disponible en Internet: <http://www.juliogaravito.edu.co/laboratorioproduccion.html>

ANEXOS

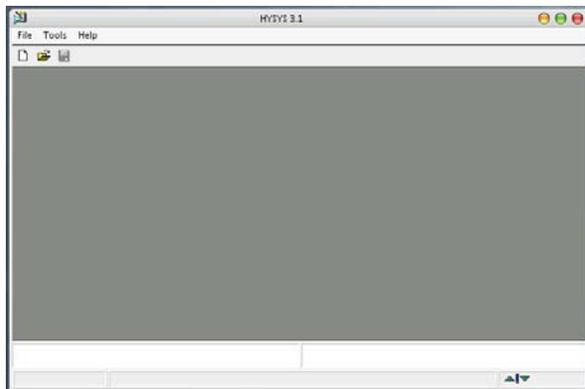
Anexo A. Manual de Usuario HYSYS[♦]

ACCESO AL PROGRAMA

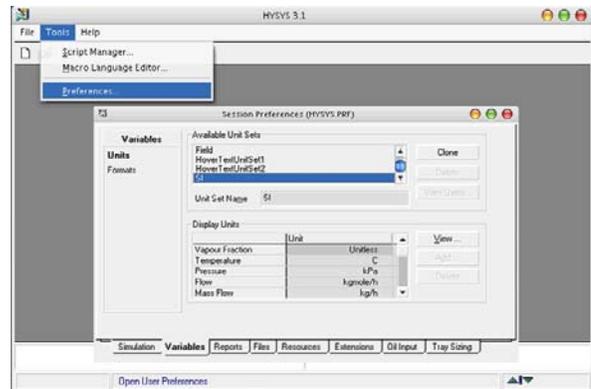
Para acceder al software especializado en simulación HYSYS, el usuario puede pulsar el botón Inicio, seleccionar Programas, allí escoger Hyprotech, organización desarrolladora de este paquete informativo e ingresar a la versión del software HYSYS disponible en el ordenador en el cual se este trabajando.

Otro método implementado para ingresar es a partir de la creación de un acceso directo, que generalmente es ubicado en el escritorio.

Figura 48. Generalidades del Programa HYSYS



Interfase inicial del programa HYSYS 3.1



Selección de unidades

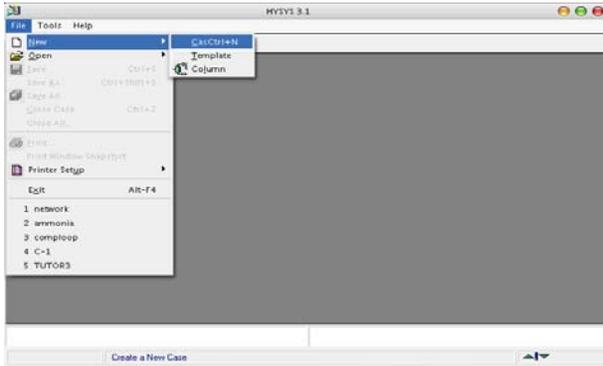
Pulse el botón *Tools*, luego escoja *Preferences* y pulse la etiqueta *Variables*

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

[♦] Consultar el Manual de Usuario del programa HYSYS versión interactiva explorando el medio magnético presentado adjuntamente con el trabajo de investigación.

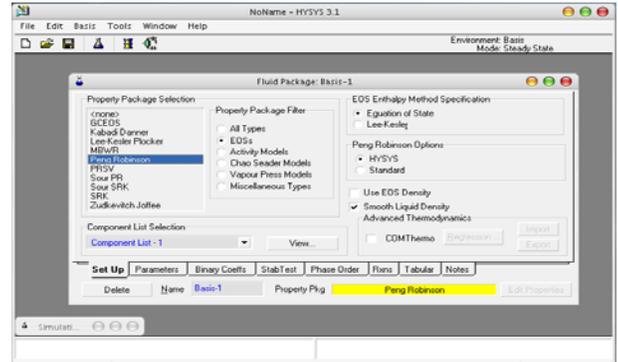
Escoja las unidades que desee, luego cierre el cuadro de diálogo. Para crear una nueva simulación, en el menú superior haga clic en File, New, Case

Figura 49. Determinación del Modelo Termodinámico



Selección de un nuevo caso

Fuente: Autor del Trabajo de Grado



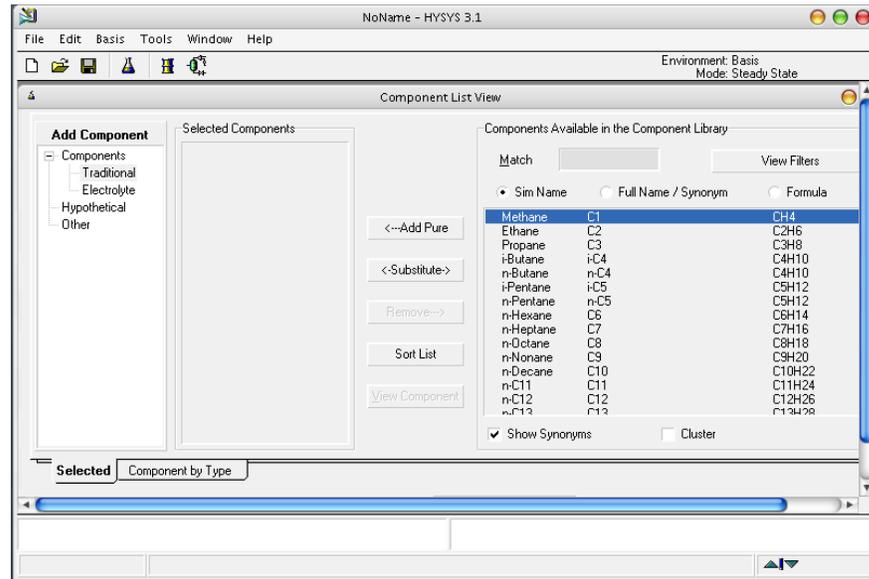
Etiqueta Fluid Pkgs

SELECCIÓN DE COMPONENTES

A continuación se presentan una serie de acciones que permitirán al usuario establecer los componentes de su interés para implementarlo en la simulación:

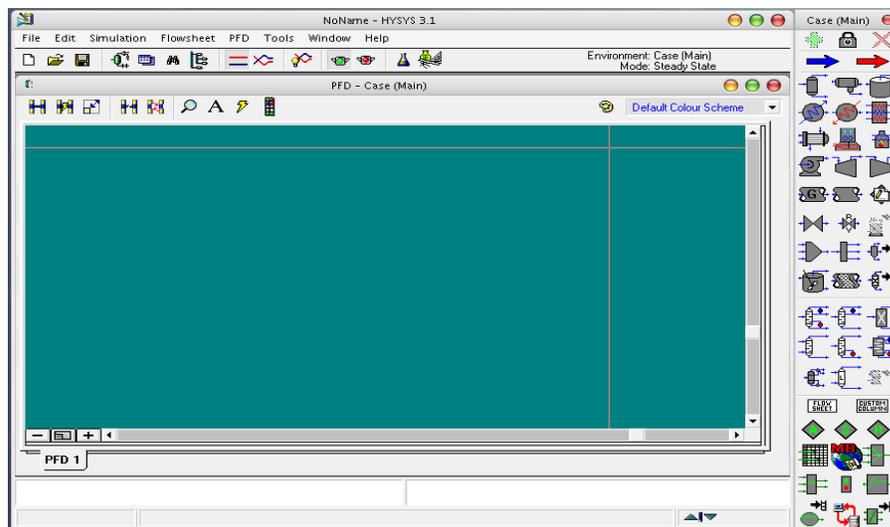
1. Seleccione la etiqueta Components.
2. Escoja los componentes que desee haciendo doble clic sobre ellos. O bien resalte el componente y haga clic sobre Add pure.
3. Puede encontrar los componentes que busca arrastrando la barra lateral, escribiendo su nombre o su formula química en el campo Match.
4. Si ha seleccionado un componente por error y desea removerlo resalte el componente en la lista de componentes y presione el botón Remove Comps.
5. También es posible cambiar el orden de los componentes pulsando sobre el botón Sort List.

Figura 50. Selección de los Componentes



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Figura 51. Interfase PFD



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Anexo B. Manual de Usuario ANSYS[♦]

ETAPAS DE LA SIMULACIÓN

El procedimiento presentado a continuación se enfoca al desarrollo de situación en torno a procesos y aplicaciones térmicas.

PRE – PROCESAMIENTO: Esta etapa se caracteriza por el aseguramiento del trabajo, la definición del tipo de elemento a simular y las propiedades del material. Además, el usuario tendrá la posibilidad de crear un área rectangular con la finalidad de especificar una malla de control y realizar posteriormente el enmallado, nodos y elementos a analizar.

SOLUCIÓN: A partir de la especificación de las temperaturas en cada uno de los bordes definidos y el usuario podrá obtener una solución parcial del caso de simulación.

POST – PROCESAMIENTO & RE – ANÁLISIS: En esta fase el usuario podrá graficar la distribución de temperatura, seleccionar y caracterizar los nodos, Posteriormente determinar las listas resultantes, modificar la malla y reanalizar el caso simulado.

FINALIZACIÓN: Esta etapa representa la última fase de la simulación, en ella el usuario podrá guardar los datos, geometrías y comandos ejecutados y con la finalidad de realizar un análisis de los casos estudiados y posteriormente cerrar el programa.

[♦] Consultar el Manual de Usuario del programa ANSYS versión interactiva explorando el medio magnético presentado adjuntamente con el trabajo de investigación.

TIPOS DE ARCHIVOS

A continuación se presenta un listado con las extensiones más comunes presentes en los archivos del programa de cómputo ANSYS.

1. **frame.db**

Data base file (binary). Este tipo de archivo está relacionado con la creación de la geometría, condiciones de frontera y algunas soluciones.

2. **frame.dbb**

Backup data base file (binary).

3. **frame.err**

Error file (text). mensajes de precaución en torno a error

4. **frame.out**

Output of all ANSYS operations (text).

5. **frame.log**

Logfile or listing of ANSYS commands (text). Lista de todas las equivalencias ANSYS command, líneas de comando usadas durante la sesión actual.

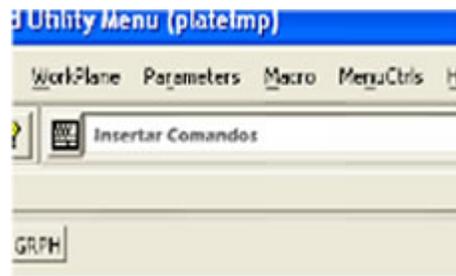
INTERFASE DE COMANDOS

Alternativamente, a la ejecución del programa, inicia una interfase en DOS en donde se ilustran los comandos que están efectuando y desarrollando.

LÍNEA DE COMANDO

Esta herramienta permite al usuario insertar comandos que posibilitan plantear, describir y resolver problemas. Se recomienda al lector dirigirse al CD interactivo en donde encontrará material complementario que describe los principales comandos de este programa de cómputo.

Figura 52. Línea de Comando



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

FINALIZACIÓN

Al finalizar cada sesión de trabajo se recomienda al usuario utilizar la opción Save Everything que permite salvar todo los desarrollos realizados en torno a la geometría y condiciones de trabajo analizados durante la simulación efectuada.

Anexo C. Manual de Usuario CYCLEPAD[♦]

ETAPAS DE LA SIMULACIÓN

A continuación se presentan las principales etapas necesarias para el desarrollo de simulaciones de ciclos termodinámicos mediante el programa de cómputo CYCLEPAD.

Interfase Gráfica Inicial: En esta fase, el usuario tendrá la posibilidad de seleccionar el tipo de análisis que desea implementar en su simulación entre Ciclos Abiertos o Ciclos de Cerrados, el primero de ellos se enfoca para condiciones de análisis en estado estable y el último se especializa en análisis Masa y Volúmenes de Control.

Por otra parte, el usuario podrá ejecutar diseños predeterminados de la biblioteca interna de programa de cómputo, cargar archivos y establecer el nombre que se desea asignar a la simulación a efectuar.

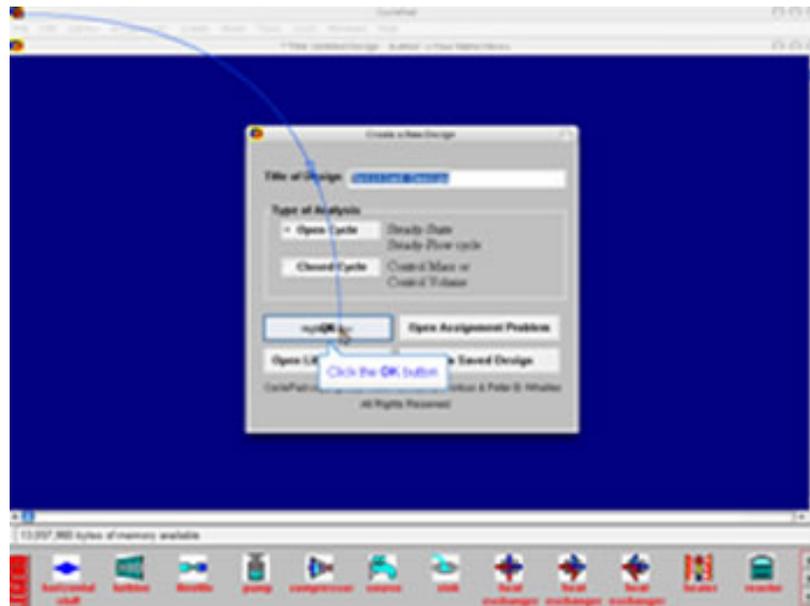
Etapas de Construcción: En esta fase, se realiza la selección e implementación de los principales elementos del ciclo de refrigeración a simular. Este proceso es conocido como modo de construcción. En la figura 54 se presenta el entorno gráfico que el usuario obtendrá a partir de la ejecución de esta fase.

Etapas de Análisis: Modo de análisis, etapa en la cual se establecen las condiciones de operación de cada estado del sistema que se desea simular, es decir, la selección de las sustancias, propiedades generales de los equipos y del

[♦]Consultar el Manual de Usuario del programa CYCLEPAD versión interactiva explorando el medio magnético presentado adjuntamente con el trabajo de investigación.

ciclo. Esta fase se caracteriza por incluir en su entorno gráfico un fondo blanco y lazos conectores de color azul, como se ilustra en la Figura 55.

Figura 53. Interfase CYCLEPAD



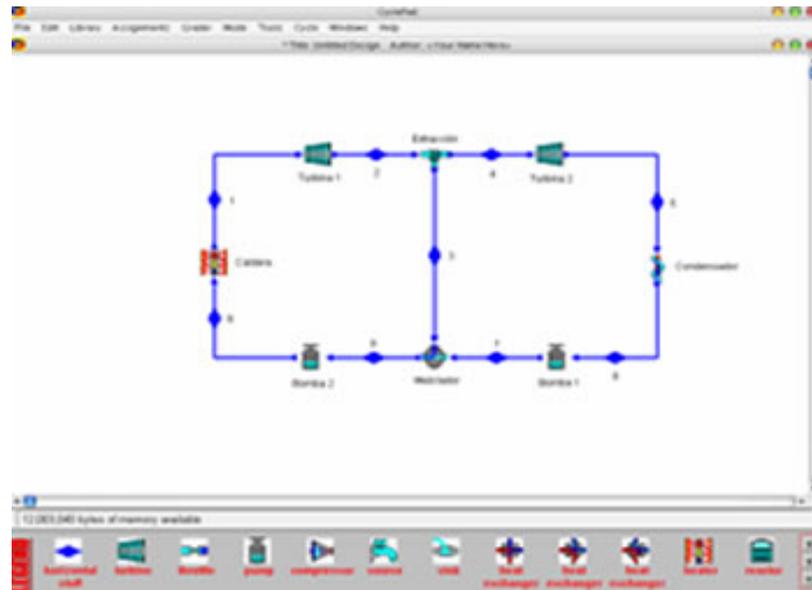
Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Figura 54. Modo de Construcción



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Figura 55. Modo de Análisis



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Componentes más representativos



Enfriador

Caldera

Intercambiador de calor

Turbina

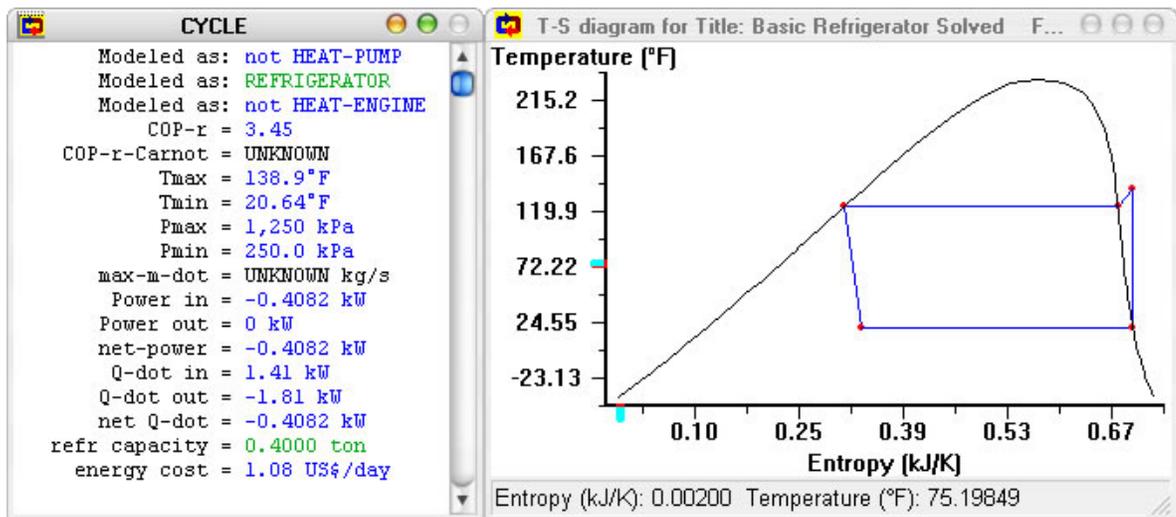
Compresor

Bomba

Visualización y Análisis de Resultados

Etapas final de la simulación en la cual se obtienen resultados gráficos y analíticos de las condiciones de operación de cada una de las etapas presentes en el ciclo termodinámico analizado.

Figura 56. Resultados CYCLEPAD



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Anexo D. APLICACIONES[♦]

En este apartado se ilustran y plantean algunas aplicaciones relevantes en torno a transferencia de masa y energía, enfocados al programa de cómputo HYSYS.

MEZCLA DE GASES

Procedimiento

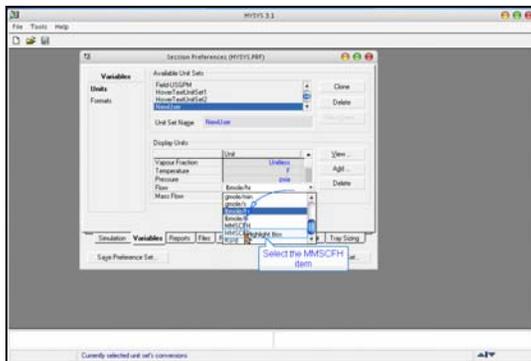
- **ETAPA I:** Caracterizar los componentes de los gases a analizar.

Descripción del Problema

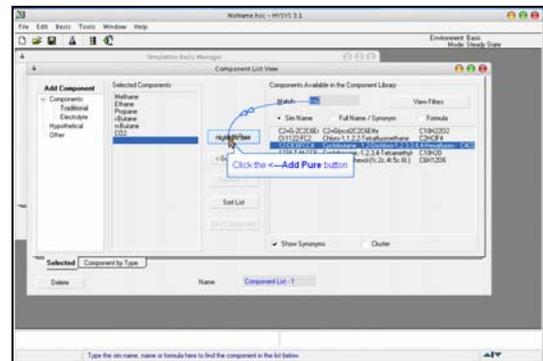
Mezclar dos corrientes de gases caracterizados en forma diferente mediante la implementación de una operación unitaria de mezclado.

Figura 57. Generalidades HYSYS

Determinación de Unidades



Definición de los Componentes



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

[♦] Consultar el medio magnético anexo en donde se profundizan las aplicaciones presentadas.

Tabla 20. Componentes

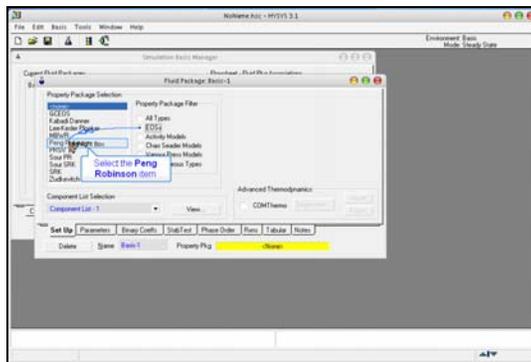
Nombre	Formula
Nitrógeno	N_2
Dióxido de carbono	CO_2
Metano	C1
Etano	C2
Propano	C3
i - Butano	i-C4
n - Butano	n-C4

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **ETAPA II:** Determinación del modelo termodinámico e ingreso al ambiente de simulación.

Figura 58. Ambiente de Simulación

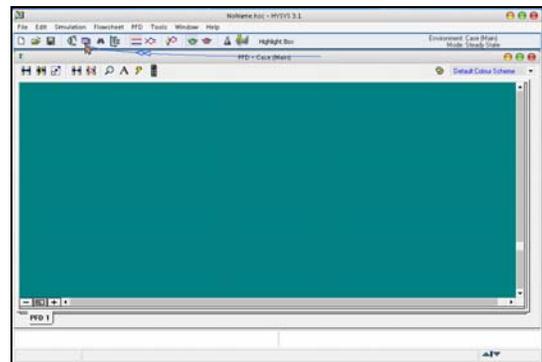
Interfase Modelo Termodinámico



El paquete termodinámico recomendado para efectuar la simulación es la EOS de Peng Robinson.

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Interfase PFD

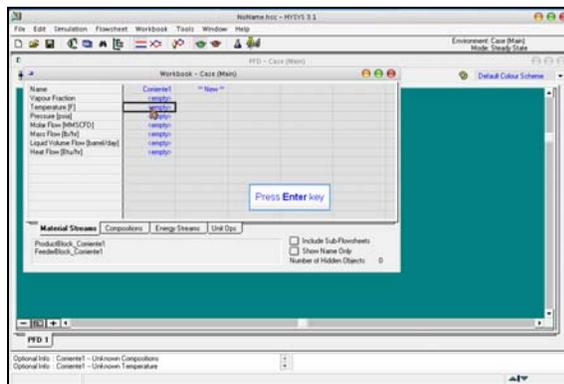


En esta etapa el usuario ha realizado las fases necesarias para ingresar en el PFD

Workbook

Esta función permitirá al usuario visualizar el comportamiento de las corrientes de materia caracterizadas a partir de la presentación de sus propiedades más significativas.

Figura 59. Interfase Gráfica Workbook



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

- **ETAPA III:** Especificación de las condiciones de operación y caracterización de las corrientes de materia.

Tabla 21. Condiciones de Operación de las Corrientes

	P [kPa]	T [C]	m [Kg/s]
Corriente 1			
Corriente 2			

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Posteriormente, es necesario definir el porcentaje en fracción Molar de cada uno de los componentes seleccionados en las corrientes de materia caracterizadas.

- **ETAPA IV:** Determinación de Envoltorio de Fase e implementación de las operaciones unitarias.

Un método alternativo para crear una corriente de materia es utilizando las barra de herramientas presente en el ambiente de simulación

Figura 60. Tipos de Corrientes



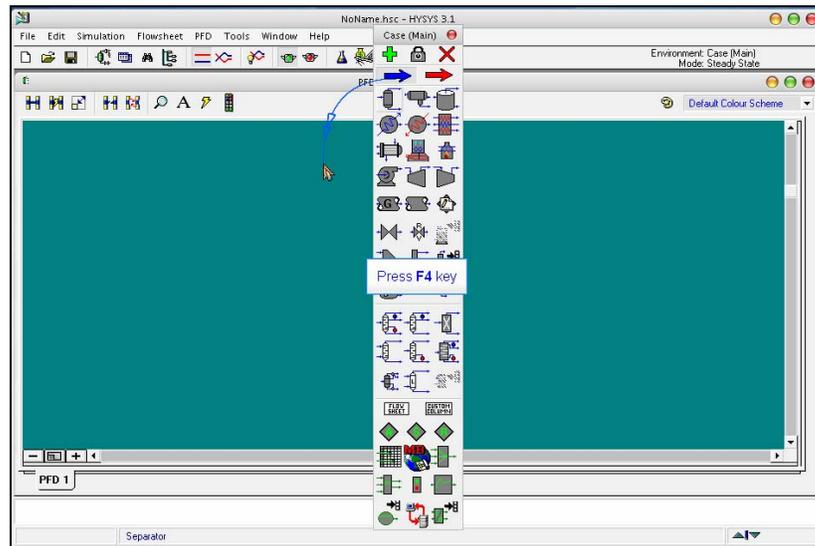
Corrientes de energía



Corrientes de materia

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Figura 61. Paleta de Herramientas



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Una de las herramientas más relevantes del programa está en la presentación de Diagrama de Fase; para realizarla es necesario implementar la herramienta llamada ENVELOPE ubicada en las utilidades UTILITY de la barra de herramientas. A partir de ella, es posible establecer los valores de las propiedades dicrondertermica y dicroderbarica, vitales en el transporte de gases.

Figura 62. Análisis Gráfico de Estados

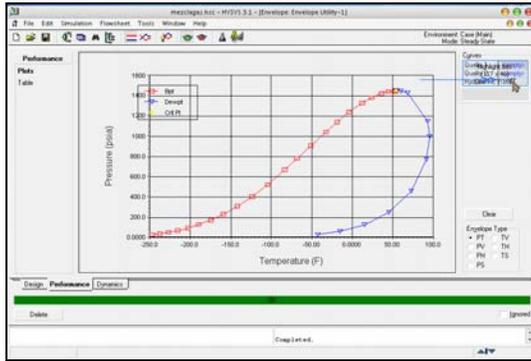
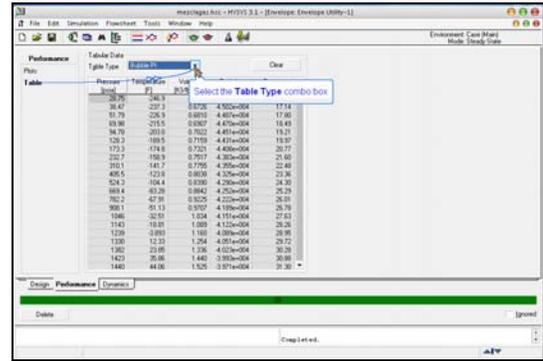


Diagrama P - T



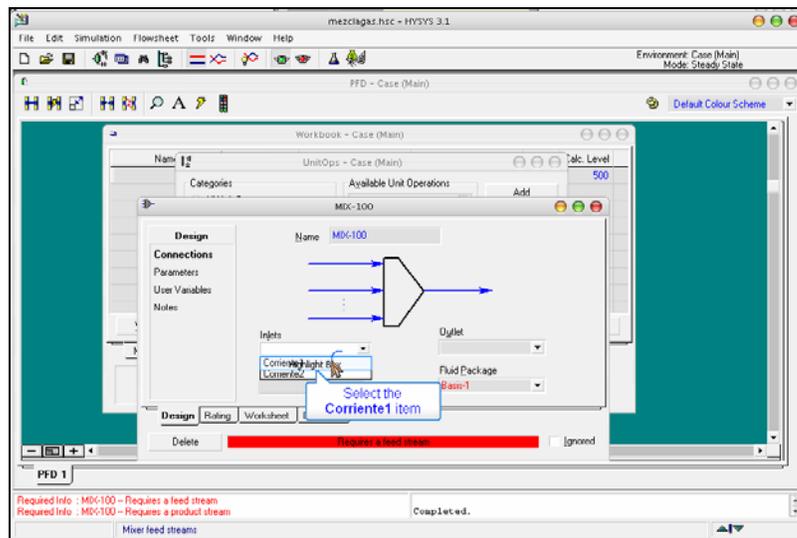
Propiedades de las Corrientes

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

MEZCLADOR

En esta etapa se implementará el mezclador para combinar las corrientes de gas. Para llevar a cabo esta etapa se debe agregar una operación unitaria en nuestro *Workbook*.

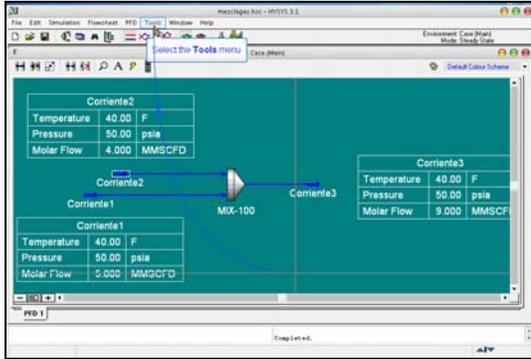
Figura 63. Determinación de las Corrientes en el Mezclador



Fuente: Autor del Trabajo de Grado

■ **ETAPA IV: Análisis e interpretación de resultados**

Figura 64. Presentación de Resultados



Interfase PFD

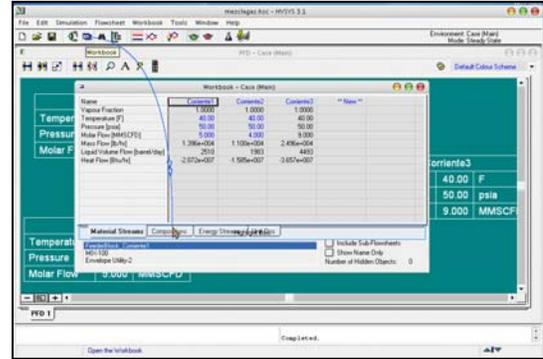


Tabla de Datos

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

Tabla 22. Resultados Obtenidos

Nombre	Corriente 1	Corriente 2	Mezclador
Temperatura [F]			
Presión [psia]			
Flujo Molar			
Flujo Másico			
Flujo de Calor			

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

6. Considera adecuado y relevante el material de apoyo presente.

- a. Malo
- b. Regular
- c. Bueno
- d. Muy Bueno

7. Emita su concepto con relación a los módulos implementados

- a. Malo
- b. Regular
- c. Bueno
- d. Muy Bueno

8. Considera que el entorno del manual interactivo que es amigable al usuario.

- a. Malo
- b. Regular
- c. Bueno
- d. Muy Bueno

9. ¿Qué aspectos cree que se podrían mejorar?

En la Tabla 23 se presenta las respuestas emitidas por los estudiantes.

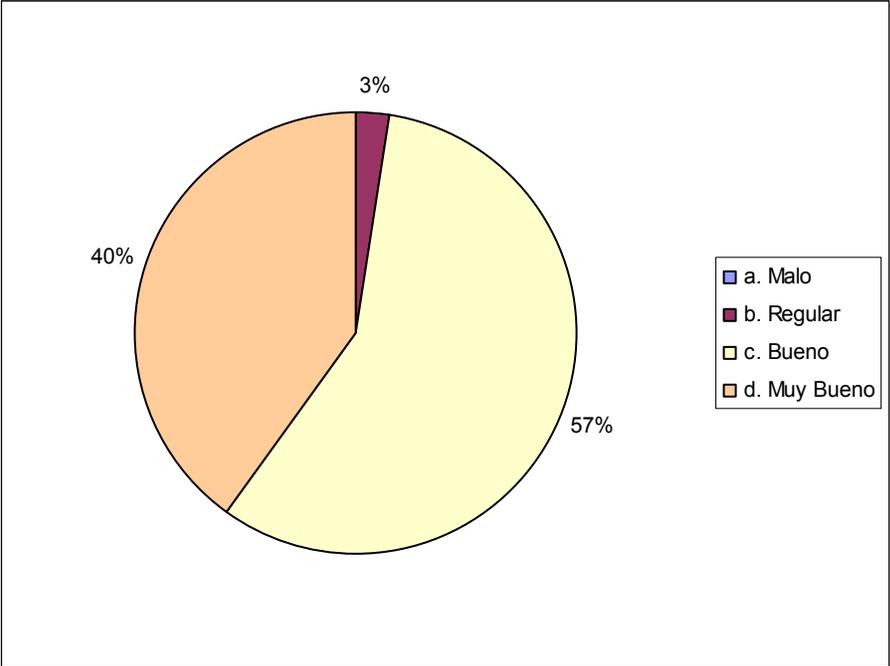
Tabla 23. Resultados Encuestas

Resultados	Totales
a. Malo	0
b. Regular	1
c. Bueno	23
d. Muy Bueno	16

Fuente: Autor del Trabajo de Grado

En la Figura 65 se ilustra los resultados obtenidos en la fase de socialización del proyecto, efectuada a estudiantes de la facultad de Ingeniería en Energía de los últimos semestres, adjuntamente al final de este anexo se presentan los formatos diligenciados por los estudiantes.

Figura 65. Resultados Encuestas



Fuente: Autor del Trabajo de Grado