

ENTORNOS VIRTUALES DE ENSEÑANZA

APRENDIZAJE EN TERMODINÁMICA: NUEVAS REALIDADES

Adolfo Ávila Murcia

Andrés Escorcía Varela

Luis Obregón Quiñones

Marley Vanegas Chamorro

Guillermo Valencia Ochoa

**Entornos virtuales de
enseñanza - aprendizaje en
Termodinámica: Nuevas realidades**

Entornos virtuales de enseñanza- aprendizaje en Termodinámica: Nuevas realidades / Adolfo Ávila Murcia, Andrés Escorcía Varela, Luis Obregón Quiñones, Guillermo Valencia Ochoa, Marley Vanegas Chamorro. – Barranquilla, Colombia., Universidad Autónoma de Caribe, 2018.

143 páginas. Ilustraciones.

Incluye referencias bibliográficas.

ISBN: 978-958-5431-15-7

1. Termodinámica -- Enseñanza-Aprendizaje -- 2. Sistemas de refrigeración -- Enseñanza-Aprendizaje -- 3. Acondicionamientos de aire -- Enseñanza-Aprendizaje -- I. Ávila Murcia, Adolfo., Escorcía Varela, Andrés., Obregón Quiñones, Luis., Valencia Ochoa, Guillermo., Vanegas Chamorro, Marley. -- II. Tit.

CDD: 536.7 E61

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE – BIBLIOTECA

Entornos virtuales de enseñanza- aprendizaje en Termodinámica: Nuevas realidades

© *Ing. Adolfo Ávila Murcia*

© *Ing. Andrés Escorcía Varela*

© *Ph. D. Luis Obregón Quiñones*

© *MSc. Guillermo Valencia Ochoa*

© *Ph. D. Marley Vanegas Chamorro*

© *Universidad Autónoma del Caribe*

ISBN 978-958-5431-15-7

Director de Publicaciones: Guillermo Mejía Mendoza

Coordinador de Publicaciones Científicas: Adalberto Bolaño Sandoval

Diagramación: Gabriel Manotas Guevara

Diseño de portada: Andrés Escorcía Varela

Financiamiento: El presente documento ha sido desarrollado con el apoyo de los programas de Ingeniería Química e Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico, la Vicerrectoría de Docencia y la Vicerrectoría de Investigación, Extensión y Proyección Social.

Ejecutora: Universidad del Atlántico

Queda hecho el depósito legal (Ley 44 de 1993, el decreto 460 de 1995, el decreto 2150 de 1995 y el decreto 358 de 2000).

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este libro, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, por medio de cualquier proceso, comprendidos la reprografía, microfilm, fotocopia, offset, fónico y el tratamiento informático (Ley 23 de 1982)

**Adolfo Ávila Murcia
Andrés Escorcía Varela
Luis Obregón Quiñones
Marley Vanegas Chamorro
Guillermo Valencia Ochoa**

**Entornos virtuales de
enseñanza - aprendizaje en
Termodinámica: Nuevas realidades**



Editorial Uniautónoma

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

- ✓ Dios, como fuente de toda razón y justicia, por permitirnos comprender su maravillosa obra que es la naturaleza e iluminarnos en cada proyecto llevado a cabo y poder así sacar este libro.
- ✓ Nuestras familias, por brindarnos siempre su apoyo.

La Universidad Autónoma del Caribe, nuestros compañeros y estudiantes, que permitieron que las investigaciones pudieran realizarse.

ÍNDICE

TABLA DE CONTENIDO

PRÓLOGO..	4
INTRODUCCIÓN .	13
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA..	15
1.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA ..	15
1.1.1. Sistema termodinámico..	15
1.1.2. Equilibrio termodinámico..	17
1.1.3. Postulado de estado ..	17
1.2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA TERMODINÁMICA ..	21
1.2.1. Principio de la conservación de la materia ..	21
1.2.2. Primera ley de la Termodinámica ..	22
1.2.3. Segunda ley de la Termodinámica .	23
1.3. CICLOS TERMODINÁMICOS DE POTENCIA DE GAS Y VAPOR ..	23
1.3.1. Ciclo de vapor de Carnot ..	24
1.3.2. Ciclo Rankine simple: Ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor ..	25
1.3.3. Ciclo Rankine ideal con recalentamiento ..	26
1.3.4. Ciclo Rankine ideal regenerativo ..	27
1.3.5. Ciclo Rankine ideal con cogeneración ..	28
1.3.6. Ciclo Brayton: Ciclo ideal para los motores de turbina de gas. ..	30
1.3.7. Ciclo combinado: Rankine ideal simple-Brayton ideal. ..	31
1.4. CICLOS TERMODINÁMICOS DE REFRIGERACIÓN ..	32
1.4.1. Ciclo de refrigeración de Carnot ..	32
1.4.2. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor ..	34
1.4.3. Sistemas de refrigeración en cascada. ..	35
1.4.4. Sistemas de refrigeración multietapa. ..	37
1.4.5. Sistemas de refrigeración por absorción ..	39
1.5. PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE ..	40
1.5.1. Humedad específica, humedad relativa y entalpía de mezcla ..	41
1.5.2. Calentamiento simple. ..	44
1.5.3. Calentamiento con humidificación ..	44
1.5.4. Enfriamiento simple ..	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema termodinámico.	14
Figura 2. Sistema termodinámico cerrado y abierto...	15
Figura 3. Carta de compresibilidad generalizada de Nelson-Obert...	19
Figura 4. Diagrama T-s para el ciclo de Carnot de vapor...	24
Figura 5. Esquema representativo y diagrama T-s, ciclo Rankine ideal simple...	25
Figura 6. Esquema representativo y diagrama T-s del ciclo Rankine ideal con recalentamiento...	26
Figura 7. Esquema representativo y diagrama T-s del ciclo Rankine ideal regenerativo...	27
Figura 8. Esquema representativo del ciclo Rankine ideal con cogeneración...	29
Figura 9. Diagrama T-S y diagrama P-v para un ciclo Brayton ideal.	30
Figura 10. Esquema representativo y diagrama T-s del ciclo combinado.	31
Figura 11. Esquema representativo y diagrama T-s de un sistema de refrigeración trabajando en el ciclo de refrigeración de Carnot.	32
Figura 12. Esquema representativo y diagrama T-s de un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.	34
Figura 13. Esquema representativo de un sistema de refrigeración en cascada.	35
Figura 14. Esquema representativo de un sistema de refrigeración multietapas...	37
Figura 15. Esquema representativo de un sistema de refrigeración por absorción...	38
Figura 16. Esquema de una carta psicrométrica.	42
Figura 17. Esquema representativo de un proceso de calentamiento de aire.	43
Figura 18. Esquema representativo de un proceso de calentamiento de aire con humidificación.	44
Figura 19. Esquema representativo de un proceso de enfriamiento de aire..	44
Figura 20. Esquema representativo de un proceso de enfriamiento simple con deshumidificación..	45
Figura 21. Esquema representativo de una torre de enfriamiento.	46
Figura 22. Diagrama de flujo que describe la metodología utilizada para el diseño e implementación del laboratorio virtual de Termodinámica...	47
Figura 23. Entorno de desarrollo Guide.	53
Figura 24. Representación de la metodología para desarrollar el software del módulo de las propiedades de las sustancias puras.	55
Figura 25. Diagrama de flujo que describe la metodología para desarrollar las aplicaciones de los módulos del laboratorio virtual de Termodinámica.	56
Figura 26. Módulos que contiene el laboratorio virtual en Termodinámica.	59
Figura 27. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo de las propiedades Termodinámicas.	63
Figura 28. Ventana principal de la aplicación Pure Substances V.1.0.	64
Figura 29. Ventana principal calcular propiedades..	65
Figura 30. Presentación de resultados en Pure Substance V.1.0.	66
Figura 31. Cálculo de propiedades del dióxido de carbono a 40 kPa y 350 K.	67

Figura 32. Ventana de inicio de la aplicación Power Cycle V.2.	68
Figura 33. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación Rankine simple.	70
Figura 34. Ventana de la aplicación ciclo Rankine simple.	71
Figura 35. Resultados del ejercicio 11-26 (M).	73
Figura 36. Ventana de inicio de la aplicación Refri-term V.2.0...	74
Figura 37. Cálculo del ciclo real de refrigeración en Refri-term V.2.0...	75
Figura 38. Diagrama de flujo del algoritmo para el ciclo de refrigeración simple.	77
Figura 39. Resultado del ejercicio 12-12.. . . .	78
Figura 40. Ventana principal de Psycrofast 2014.	79
Figura 41. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación calentamiento simple	80
Figura 42. Ventana de la aplicación calentamiento simple.	81
Figura 43. Resultados del ejercicio 14-75...	83
Figura 44. Página principal del laboratorio virtual de Termodinámica en plataforma Sicvi de UniAtlántico.	84
Figura 45. Módulo de sustancias puras del laboratorio virtual de Termodinámica en plataforma Sicvi de UniAtlántico.. . . .	85
Figura 46. Módulo de ciclos de potencia del laboratorio virtual de Termodinámica la plataforma Sicvi de UniAtlántico.. . . .	85
Figura 47. Ventana de la guía teórico-práctica del módulo ciclos de potencia del laboratorio virtual de Termodinámica la plataforma Sicvi de UniAtlántico.	86
Figura 48. Porcentaje de comprensión de los conceptos.	87
Figura 49. Porcentaje de capacidad para resolver problemas.	87
Figura 50. Material utilizado como complementario en la asignatura..	88
Figura 51. Flexibilidad en los parámetros del proceso.	88
Figura 52. Intuición en interfaces del LV vs. programas licenciados en el mercado.	89
Figura 53. Comparación entre aceptación real y expectativa del LV..	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de controles intrínsecos de Visual Basic.	51
Tabla 2. Lista de controles Activex en Visual Basic.	52
Tabla 3. Tabla de componentes principales de MatLab..	54
Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Power Cycle V.2.0 y los datos reportados en la literatura de los diferentes ejercicios.	72
Tabla 5. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Refri-term V.2.0 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 12-12.	78
Tabla 6. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Psycrofast 2014 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 14-75.	82

Prólogo

El libro fue desarrollado con la finalidad que los estudiantes de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Química y carreras afines logren alcanzar mayores capacidades en el área térmica. Aquí se tocan fenómenos que no se alcanzan a estudiar durante el desarrollo de una clase de termodinámica común que incluya laboratorios reales. Permite a los estudiantes analizar muchas variables mediante la simulación de procesos específicos y entender las diferentes respuestas, permitiéndoles visualizar de una manera más general cualquier problema que se pudiese presentar en un proceso térmico y encontrar la solución lo más rápida y efectiva posible.

Este documento es de mucha importancia debido a que permite ampliar la visión de los alcances que se pueden lograr actualmente en la ingeniería aprovechando los recursos de las tecnologías de la información y comunicaciones - TICs, algo difícil de obtener en años pasados cuando solo se podía enfocar en la parte experimental lo cual era complicado por la falta de recursos para comprar equipos altamente costosos y al poder computacional y de redes que antes no era tan robusto. El libro permite al lector entender la gran importancia que tiene mezclar las clases teórico-experimentales con las simulaciones computacionales ya que potencia altamente las habilidades mentales por medio de interpolaciones hechas en simulación de eventos experimentales reales con un porcentaje de error aceptable.

Las carreras de Ingeniería Química y Mecánica en nuestra alma mater son muy rigurosas y los estudiantes responden muy bien a las exigencias establecidas logrando preparar estudiantes de alta calidad. El sector industrial certifica lo mencionado debido al gran desempeño que logran en los cargos alcanzados. Teniendo en cuenta este aspecto, de la excelencia de los estudiantes en la Universidad, se pensó en incrementar aún más ese potencial usando la tecnología computacional creada en los últimos años. Si los estudiantes han respondido excelentemente al reto de las exigencias de las carreras indicadas, también podrían responder muy bien al complementar los laboratorios físicos con los virtuales permitiéndoles ir más allá de los alcances ordinarios. Esto podría repercutir en un futuro cercano con la mejora de nuestro sector industrial ayudándolo a ser mucho más competitivo a nivel nacional e internacional en la calidad de productos y en velocidad de producción lo cual sería muy útil a nuestra región.

Considerando lo dicho anteriormente se comenzó a idear la manera de cómo lograr hacer posible el proyecto. Se comenzó inicialmente por mejorar uno de los puntos básicos de ambas ingenierías como lo es la termodinámica. Los focos fueron como obtener propiedades de sustancias puras en estado líquido o gaseoso lo más rápido posible, los ciclos termodinámicos de potencia, los ciclos termodinámicos de refrigeración y procesos de acondicionamiento de aire. Teniendo en cuenta cada uno de los focos se procedió a diseñar una serie de programas altamente detallados y con gran sentido pedagógico que pudieran resolver problemas de cada uno de los temas anteriores y poder realizar simulaciones. Luego se pensó en como tener todas en un solo sistema en el que los estudiantes tuvieran fácil acceso e interacción. Así surgió la idea de diseñar un entorno cliente-servidor para la plataforma SICVI- 567 en el cual se pudiera cargar todos los programas y trabajarlos simultáneamente teniendo en cuenta aspectos como la amigabilidad y facilidad de interacción de manera que el estudiante tuviese un buen ambiente de aprendizaje. De esa manera se obtuvo un entorno virtual robusto de enseñanza aprendizaje el cual se puso en práctica obteniendo gran aceptación por parte de los estudiantes aceptándola como una herramienta complementaria de formación. Esta información se obtuvo a partir

de encuestas realizadas antes y después de la aplicación del nuevo entorno virtual evidenciándose un aumento en la capacidad de los estudiantes de comprender mejor los conceptos y de resolver problemas. Las encuestas fueron validadas con el método de consistencia interna basado en el alfa de Cronbach.

Las aplicaciones se desarrollaron en los softwares Matlab® y Microsoft Visual Studio® utilizando diferentes herramientas y controles. El entorno virtual utilizado fue la plataforma SICVI de la Universidad del Atlántico en donde se realizó el montaje de los módulos utilizando el lenguaje HTML (HyperText Markup Language) que es un lenguaje de marcado para la elaboración de páginas web. Las ecuaciones fueron tomadas de diversos libros de termodinámica y los problemas con casos de estudio desarrollados fueron sacados de libros adicionales con el fin de validar los programas.

Luis Obregón Quiñones
Docente Facultad de Ingeniería
Universidad del Atlántico

Introducción

Las prácticas de laboratorio son muy importantes para los estudiantes de ingeniería, debido a que estas le permiten construir y comprender los conceptos previamente adquiridos relacionándolos con experiencias prácticas, por lo que aquí tiene lugar el aprendizaje significativo que se da por descubrimiento en el campo de las TICs (Tecnologías de la Información y de la Comunicación).

El avance de la tecnología moderna ha dado lugar a dos nuevos tipos de laboratorios, los simulados y los controlados remotamente. Los laboratorios virtuales o simulados se enfocan en la comprensión conceptual, siendo este el objetivo principal de este trabajo investigativo, el cual está orientado a la implementación de un laboratorio virtual en la plataforma SICVI (Sistemas de créditos complementarios virtuales) de la Universidad del Atlántico que complementa la enseñanza de las asignaturas de Termodinámica en los estudiantes de ingeniería.

Muchos de los trabajos de grados de los estudiantes en el área térmica han sido aplicaciones que simulan diferentes procesos, pero la modalidad actual de la Universidad del Atlántico para almacenar este material no permite un flujo de información ni el fácil acceso que exige el ritmo de hoy en día.

Por lo anterior, se necesita crear un espacio para organizar y poner a disposición todo este material para ayudar al aprendizaje significativo del

estudiante, el cual se hace necesario al pasar al campo laboral donde se enfrenta a problemas sobre operación, selección y diseño de máquinas de sistemas térmicos que funcionan con diferentes tipos de fluidos y procesos energéticos, por lo que un mayor número de experiencias permitiría al estudiante tener una mejor preparación desarrollando habilidades superiores de conocimiento que son aplicar, analizar y crear permitiéndole conocer y dominar las bases fundamentales.

Esta tecnología se puede aprovechar usando la plataforma del SICVI que es el escenario virtual de la Universidad del Atlántico que permite el uso de nuevos conjuntos de técnicas de información y creación de herramientas computacionales que ayudan a los estudiantes a abarcar campos más amplios de la ingeniería en un corto tiempo.

Esta investigación se justifica también en crear una herramienta virtual a la vanguardia para la Universidad del Atlántico que permita fortalecer el proceso de formación de los estudiantes en el área térmica.

Muchos resultados de investigación excelentes y aplicaciones desarrolladas de gran alcance son guardados en la biblioteca de la Universidad sin que los estudiantes tengan conocimiento de estos, además de no poder acceder fácilmente. La creación de este laboratorio virtual permite la recopilación de trabajos para que los estudiantes puedan tener un fácil acceso a estos de forma organizada y aprovechar su contenido.

Se espera que este espacio sirva para posteriores ejercicios investigativos que fortalezcan y complementen el laboratorio virtual con nuevas aplicaciones y experiencias.

Conceptos y principios básicos de termodinámica

1.1. Conceptos básicos de termodinámica

La termodinámica técnica es una rama de la ciencia que se especializa en el estudio de las transformaciones e interacciones de la energía en forma de calor y trabajo. Los campos de aplicación de la termodinámica en Ingeniería Mecánica son la generación de potencia, los sistemas de refrigeración, acondicionamiento de aire, etcétera.

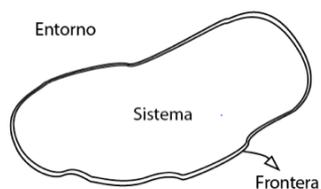
La termodinámica técnica tiene como objeto de estudio los sistemas termodinámicos (conjunto de materia que se puede aislar espacialmente para su estudio y que coexiste con un entorno infinito e imperturbable).

1.1.1. Sistema termodinámico

Se define como una región o porción de materia o espacio, sobre el cual se fija la atención para realizar un análisis térmico detallado. Los elementos de un sistema termodinámico son los alrededores o entorno y la frontera que separa al sistema de los alrededores que puede ser fija o móvil; como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Sistema termodinámico

Fuente: Elaborada por los autores.



Un sistema de masa fija se llama sistema cerrado o masa de control, en este tipo de sistema no hay flujo de masa, el ejemplo típico de esta clase de sistemas es el dispositivo cilindro-émbolo mostrado en la Figura 2(a); y un sistema que hay flujo de masa pasando a través de las fronteras del sistema se conocen como sistema abierto o volumen de control, es el caso de cómo se modelan turbinas, compresores, bombas, calderas y otros, como se observa en la Figura 2(b).

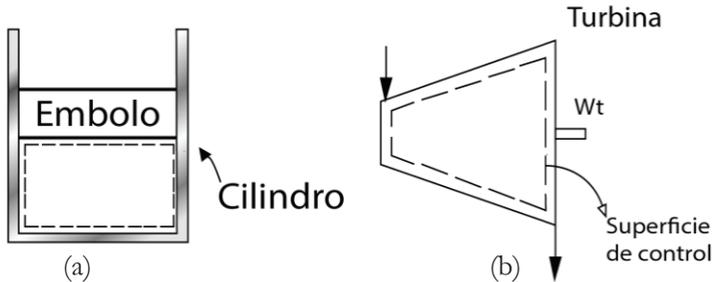


Figura 2. Sistema termodinámico cerrado y abierto

Fuente: Elaborada por los autores.

El estado de un sistema termodinámico en equilibrio puede describirse mediante propiedades termodinámicas o variables de estado, propiedades mensurables como la temperatura (T), la presión (P) o el volumen (V). Es posible identificar y relacionar entre sí muchas otras variables como la densidad (X) el calor específico (C_p), con lo que se obtiene una descripción más completa del sistema y de su relación con el entorno.

Las propiedades termodinámicas pueden ser intensivas o extensivas. Las propiedades extensivas dependen del tamaño o extensión del sistema, como la masa (m) y el volumen (V). Las propiedades intensivas son independientes del tamaño del sistema, como la temperatura, la presión y densidad.

Las propiedades extensivas pueden expresarse por unidad masa, y se llaman propiedades específicas. Por ejemplo: el volumen específico, que es la relación entre el volumen total y la masa del sistema ($v = V/m$).

1.1.2. Equilibrio termodinámico

Un sistema está en equilibrio termodinámico cuando no se observa ningún cambio en sus propiedades termodinámicas a lo largo del tiempo. Cuando un sistema pasa de un estado de equilibrio a otro, se dice que tiene lugar una transformación o proceso termodinámico. Un sistema que ha sido sometido a una serie de procesos y los estados inicial y final son idénticos, se denomina ciclo.

1.1.3. Postulado de estado

El estado de un sistema se describe mediante sus propiedades, pero se sabe por experiencia que no es necesario especificarlas todas con la finalidad de fijarlo. Una vez especificadas suficientes propiedades, el resto asumen automáticamente ciertos valores; es decir, especificar cierto número de propiedades es suficiente para fijar un estado. El número de propiedades para fijar un estado de un sistema se determina mediante el postulado de estado:

*El estado de un sistema comprensible simple se especifica por completo mediante dos propiedades intensivas independientes.*¹

Un sistema comprensible simple es cuando el sistema carece de efectos eléctricos, magnéticos, gravitacionales, de movimiento y tensión superficial. Estos efectos se deben a campos de fuerza externos y son insignificantes.

El postulado de estado necesita que dos propiedades termodinámicas sean independientes para fijar el estado.

Una sustancia con composición química homogénea e invariable se denomina sustancia pura. Esta puede existir en más de una fase, pero la composición es la misma en todas las fases. Así agua líquida, mezcla de agua líquida y vapor de agua, mezcla de hielo y agua líquida son todas sustancias puras ya que cada fase tiene la misma composición química.

¹ ÇENGEL, Yunus y Boles, Michael, *Termodinámica*, 7^{ma} ed. México: McGraw-Hill, 2012. p. 14.

Durante el cambio de fase que sufre la sustancia pura pasa por unos estados así:

Cuando la sustancia está en fase líquida, y se encuentra distante de comenzar a vaporizarse, se conoce como líquido comprimido o subenfriado. Cuando se empieza a vaporizar, es decir, en este estado la primera gota de líquido se convierte en vapor se conoce como líquido saturado. Durante la ebullición la sustancia se encuentra en dos fases (líquido y vapor) en equilibrio a este estado se conoce como mezcla saturada. Por último cuando la sustancia está en fase gaseosa y esta distante de comenzar a condensarse, recibe el nombre de vapor sobrecalentado.

El estado que tenga cualquier sustancia puede definirse usando las tablas termodinámicas que son el resultado de las mediciones experimentales y cálculos aplicados para algunas sustancias. De igual manera el estado también se puede conseguir usando las ecuaciones de estado según el caso.

Un punto muy importante que será utilizado es el concepto de líquido y vapor saturados. El líquido saturado se refiere a aquel que por cualquier paso de energía que se le dé comienza a evaporarse. El vapor saturado por el contrario es aquel que por cualquier cantidad de energía por mínima que sea, el vapor comienza a condensarse.

Para encontrar las propiedades del líquido saturado y vapor saturado existen dos tablas que son iguales, su diferencia radica en que una varía la temperatura en incrementos constantes, y en la otra varía la presión en incrementos constantes.

En estas tablas se emplea el subíndice f (y_f) para las propiedades de líquido saturado y el subíndice g (y_g) para las propiedades de vapor saturado. Donde y es cualquier propiedad termodinámica (volumen específico v , entalpía específica h , energía interna específica u , entropía específica s). También es usado el subíndice fg (y_{fg}), que es la diferencia entre los valores de vapor saturado y líquido saturado de la misma propiedad, como lo expresa la ecuación (1):

$$y_{fg} = y_g - y_f \quad (1)$$

En la mezcla saturada de líquido-vapor, la fracción másica de vapor presente en la mezcla se conoce como calidad (x) y es calculada mediante la ecuación (2):

$$X = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}} \quad (2)$$

La calidad puede tomar valores entre 0 (líquido saturado) y 1 (vapor saturado).

En el estado de mezcla saturada, el valor promedio para cualquier propiedad intensiva se determina a partir de la ecuación (3):

$$y = y_f + x(y_g - y_f) \quad (3)$$

Pero la información que suministra las tablas para las propiedades de un líquido comprimido son precarias, porque estas son independientes de la presión, puesto que es conocido que los líquidos son sustancias prácticamente incomprensibles, entonces se aproxima el líquido comprimido al estado de líquido saturado a la temperatura dada, como se muestra en la ecuación (4):

$$y \cong y @ T \quad (4)$$

A presiones supercríticas una sustancia se expande gradual y uniformemente desde la fase líquida hasta de vapor sin haber un proceso de vaporización se conoce como punto crítico. Las tres fases de una sustancia pura pueden coexistir en equilibrio en condiciones de temperatura y presión, se llama punto triple.

La otra forma de determinar las propiedades de una sustancia es usando las ecuaciones de estado, que son las que relacionan la presión, la temperatura y el volumen específico de una sustancia. Hay varias ecuaciones de estado, pero la ecuación más simple es la ecuación (5) que representa la ecuación de estado de gas ideal.

$$Pv = R_u T \quad (5)$$

donde R_u es la constante universal de los gases. Los gases se desvían de manera significativa del comportamiento de gas ideal en estados cercanos a la región de saturación y el punto crítico. Los gases se comportan como gases ideales para condiciones de baja presión y alta temperatura.

La desviación a temperatura y presión especificadas puede explicarse de manera apropiada mediante la introducción de un factor de corrección denominado factor de compresibilidad, que se define mediante la ecuación (6):

$$Z = \frac{P_v}{R_u T} \quad (6)$$

También se puede expresar por medio de la ecuación (7):

$$Z = \frac{v_{actual}}{v_{ideal}} \quad (7)$$

Si el valor de Z es igual a 1, esto indica que el gas se comporta como ideal. Si el valor de Z es mayor o menor que 1, el gas se comporta como un gas real. Mientras más grande sea la desviación de valor de Z con respecto a 1, mayor es la desviación del comportamiento respecto al comportamiento ideal del gas.

Los gases se comportan de forma similar a temperaturas y presiones normalizadas respecto a sus temperaturas y presiones críticas. Es decir, Z es aproximadamente igual a la misma presión y temperatura reducidas para todos los gases, como se muestra en la ecuación (8):

$$P_R = \frac{P}{P_{cr}} \quad \text{y} \quad T_R = \frac{T}{T_{cr}} \quad (8)$$

donde P_{cr} es la presión crítica y T_{cr} la temperatura crítica; esto se conoce como el principio de estados correspondientes. Con ayuda de la carta o gráfica de compresibilidad de Nelson-Obert mostrada en la figura 3, se puede determinar el factor de compresibilidad Z .

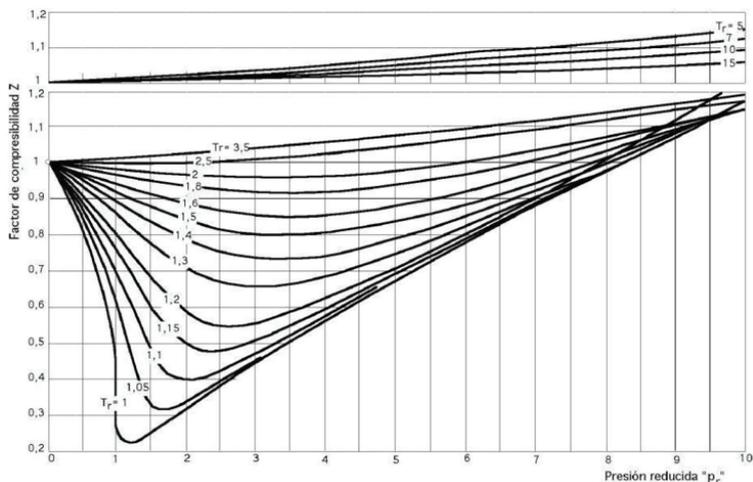


Figura 3. Carta de compresibilidad generalizada de Nelson-Obert

Fuente: Adaptada. Çengel, Yunus y Boles, Michael, *Termodinámica* 6ta ed. México: McGraw-Hill, 2009. p. 928.

Cuando no se tiene o , es necesario utilizar otra propiedad, que es el volumen específico pseudorreducido v_R , definido mediante la ecuación (9):

$$v_R = \frac{v_{actual}}{RT_{Cr} / P_{Cr}} \tag{9}$$

Otra ecuación de estado fácil de usar es la ecuación de estado de Van der Waals, que tiene dos constantes que se determinan del comportamiento de una sustancia en punto crítico, está dada por la ecuación (10):

$$\left(P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT \tag{10}$$

La ecuación de Van der Waals se diferencia de la ecuación de gas ideal en que incluye el volumen ocupado por las propias moléculas, como de las fuerzas de atracción intermoleculares existentes entre las mismas. El término b es el volumen efectivo de las moléculas en un mol de gas y tomando en cuenta las fuerzas intermoleculares.

Las constantes a y b son características de cada gas y se obtienen a partir de los datos de la presión, volumen y temperatura crítica. El punto crítico es un punto de inflexión de la isoterma T_{cr} en el diagrama $P - v$ de modo que cumple

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_{T=T_{cr} = Const} = 0 \text{ y } \left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_{T=T_{cr} = Const} = 0$$

Al llevar a cabo las derivadas y eliminar es posible obtener las constantes a y b a partir de la ecuación (11):

$$a = \frac{27R^2 T_{cr}^2}{64P_{cr}} \text{ y } b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}} \quad (11)$$

1.2. Principios fundamentales de la termodinámica

Para realizar el análisis de las diferentes transformaciones energéticas de un sistema o proceso termodinámico que experimenta un cambio de estado a través de una trayectoria definida es necesario aplicar los principios fundamentales, tales como:

1.2.1. Principio de la conservación de la materia

El principio de la conservación de la materia establece que la materia no se crea ni se destruye sino que se transforma. Para sistemas cerrados o aislados la masa es constante; para sistemas abiertos la masa puede entrar o salir de él, el principio de conservación de la materia se escribe mediante la ecuación (12):

$$m_{ent} - m_{sal} = \Delta m_{sistema} \quad (12)$$

donde m_{ent} es la masa que entra, m_{sal} es la masa que sale.

Cuando la masa fluye por un sistema que no pierde o gana masa se conoce como flujo estacionario o estado estacionario, y equivale a la ecuación (13):

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} \quad (13)$$

1.2.2. Primera ley de la Termodinámica

La primera ley de la Termodinámica es la ley de la conservación de la energía y expresa cuándo un sistema interactúa con los alrededores o con otro sistema, pues la cantidad de energía que el sistema gana o pierde es igual a la energía que pierde o ganan los alrededores o el otro sistema. En otras palabras, la energía ni se crea ni se destruye.

En sistemas abiertos o volúmenes de control hay transferencia de calor, transferencia de trabajo y transferencia de masa; así, la primera ley para sistemas abiertos se expresa mediante la ecuación (14):

$$Q_{neto} - W_{neto} = dE_{sistema}/dt \quad (14)$$

O bien puede ser formulada a partir de la ecuación (15):

$$\dot{Q}_{neto} - \dot{W}_{neto} = \sum_{Sal} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{Ent} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (15)$$

Para flujo estacionario, queda expresada por medio de la ecuación (16):

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{sistema}}{dt} = 0 \quad (16)$$

Se puede escribir de manera explícita por medio de la ecuación (17):

$$Q_{ent} - W_{ent} + \sum_{Ent} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = Q_{sal} - W_{sal} + \sum_{Sal} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (17)$$

Para procesos de flujo estacionario se asume que durante el proceso el estado del volumen de control permanece constante, es decir ninguna propiedad termodinámica dentro del volumen de control cambia con el tiempo; las propiedades termodinámicas de las masas que entran y salen del volumen de control permanecen constantes en el tiempo, y pueden ser diferentes entre cada entrada y salida; y las interacciones de energía en forma de calor y trabajo entre el volumen de control y los alrededores permanecen constantes.

1.2.3. Segunda ley de la Termodinámica

La segunda ley de la termodinámica impone restricción a la dirección en que ocurre la transferencia de calor y a diferencia de la primera ley que cuantifica los procesos de transferencia de energía la segunda ley califica como fueron realizados estos.

La segunda ley de la termodinámica da, además, una definición precisa de una propiedad llamada entropía, que corresponde a la fracción de energía de un sistema que no es posible convertir en trabajo útil.

1.3. Ciclos termodinámicos de potencia de gas y vapor

Una de las áreas de mayor interés en ingeniería es la conversión de calor en trabajo útil, debido a que la sociedad consume grandes cantidades de energía.

El ciclo de potencia no es más que un ciclo termodinámico que efectúa la conversión de calor en trabajo. Los ciclos de potencia se pueden clasificar como ciclos de potencia de gas y ciclos de potencia de vapor, dependiendo de la fase del fluido de trabajo. En los ciclos de potencia de gas, el fluido de trabajo permanece en el estado gaseoso durante todo el ciclo y en los ciclos de potencia de vapor, en los cuales el fluido de trabajo efectúa un cambio de fase durante el ciclo. Las aplicaciones de estos ciclos son en las turbinas de diferentes tipos como las de acciones militares o comerciales como también en la generación eléctrica en grandes y pequeñas instalaciones.

El mejoramiento continuo de los sistemas generadores de potencia, ha producido algunas modificaciones innovadoras en el ciclo básico de potencia, para así, aumentar la eficiencia térmica de los sistemas generadores de potencia. Entre ellos se encuentran los ciclos con recalentamiento, regenerativo y los ciclos combinados de potencia de gas y vapor.

1.3.1. Ciclo de vapor de Carnot

Con el propósito de producir trabajo de manera eficiente, puede usarse el ciclo más eficiente y más sencillo: el ciclo de Carnot. El ciclo de Carnot

es un ciclo ideal reversible que consta de cuatro etapas. En la figura 4 se muestra uno, que tiene las siguientes limitaciones de orden práctico:

- El proceso de añadir calor al fluido de trabajo $1 \rightarrow 2$ es a presión y temperatura constantes; los equipos de suministro de calor más sencillos de construir operan bajo condiciones isobáricas y no bajo condiciones isotérmicas.
- El proceso isentrópico de expansión $2 \rightarrow 3$ puede realizarse en una turbina que cumpla las siguientes condiciones técnicas: debe operar con un mínimo de humedad, pues las gotas de agua condensada producen una erosión indeseada en los álabes de la misma turbina. Por norma se desea que la calidad dentro de una turbina baje del 90 %.
- El proceso de sustracción de calor $3 \rightarrow 4$ es un proceso también a presión y temperatura constantes; se puede llevar a cabo en un condensador, aun cuando resulta difícil controlar la calidad final del vapor.
- El proceso isentrópico $4 \rightarrow 1$ consiste en una compresión de la mezcla líquido-vapor, por lo que no cumple las limitaciones técnicas: los compresores deben operar en lo posible con una sola fase.

El ciclo de Carnot no cumple con los requisitos técnicos, por lo cual no se puede utilizar como modelo para los ciclos de potencia.

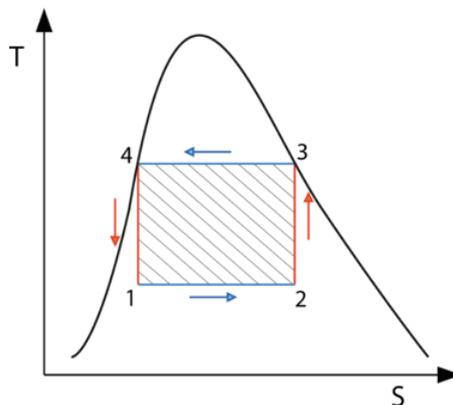


Figura 4. Diagrama T-s para el ciclo de Carnot de vapor

Fuente: Elaborada por los autores.

1.3.2. Ciclo Rankine simple: Ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor

Los inconvenientes que presenta el ciclo de Carnot se pueden eliminar reemplazándolo por un ciclo Rankine ideal simple, como se observa en la figura 5, constituido por los siguientes procesos:

- 4→1 Calentamiento a presión constante en una caldera.
- 1→2 Expansión isentrópica en una turbina.
- 2→3 Enfriamiento a presión constante en un condensador.
- 3→4 Compresión isentrópica en una bomba.

Los componentes usados en el ciclo Rankine ideal simple se analizan como un volumen de control en estado estacionario; los cambios en energía potencial y cinética son pequeños en comparación con el trabajo y la transferencia de calor que se presenta en el ciclo; la turbina y la bomba son isentrópicas (que no hay transferencia de calor), y la caldera y el condensador no realizan ni consumen algún trabajo, entonces los balances de energía y masa para cada componente se calculan a partir de las ecuaciones (18), (19), (20) y (21):

$$\text{Turbina con } q = 0 \quad W_{\text{turbina.salida}} = h_1 - h_2 \quad (18)$$

$$\text{Bomba con } q = 0 \quad W_{\text{bomba.entrada}} = h_4 - h_3 \quad (19)$$

$$\text{Condensador con } w = 0 \quad W_{\text{condensador.salida}} = h_2 - h_3 \quad (20)$$

$$\text{Caldera con } w = 0 \quad W_{\text{caldera.entrada}} = h_1 - h_4 \quad (21)$$

El rendimiento térmico del ciclo Rankine simple es calculado por medio de la ecuación (22):

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}} \quad (22)$$

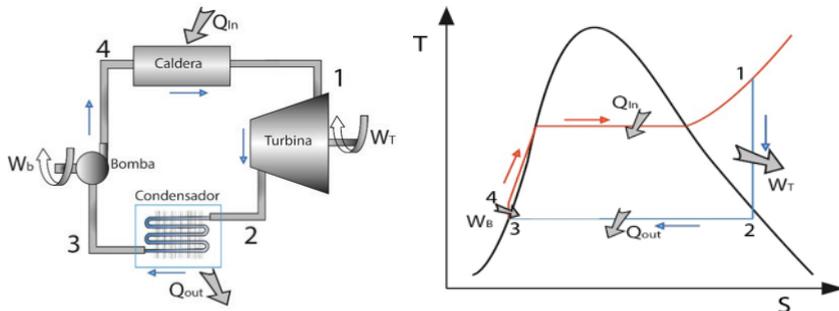


Figura 5. Esquema representativo y diagrama T-s del ciclo Rankine ideal simple

Fuente: Elaborada por los autores.

1.3.3. Ciclo Rankine ideal con recalentamiento

Este ciclo se ha desarrollado para aumentar el rendimiento térmico del ciclo y evitar al mismo tiempo la excesiva humedad en el vapor que a baja presión descarga la turbina. En figura 6 se observa el esquema del ciclo ya mencionado. En el ciclo con recalentamiento, primero se expande el vapor en la turbina 1 (turbina de alta presión) hasta una presión intermedia y se calienta a presión constante en recalentador; posteriormente se expande en la turbina 2 (turbina de baja presión) hasta la presión final de descarga. El calentamiento del vapor se efectúa en dos lugares: en la caldera (proceso 6→1) y en el recalentador (proceso 2→3). El trabajo se desarrolla en dos lugares: en la turbina de alta presión (proceso 1→2) y en la turbina de baja presión (proceso 3→4). Se sustrae calor en el condensador y se efectúa trabajo sobre el fluido en la bomba. Se tienen entonces para este ciclo las ecuaciones (23) y (24):

$$q_{\text{entrada}} = q_{\text{caldera}} + q_{\text{recalentamiento}} = (h_1 - h_6) + (h_3 - h_2) \quad (23)$$

$$w_{\text{salida}} = w_{\text{turbina1}} + w_{\text{turbina2}} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) \quad (24)$$

El rendimiento térmico de un ciclo con recalentamiento puede o no ser mayor que la eficiencia de un ciclo sin recalentamiento; esto depende de la presión a la cual se efectúe el recalentamiento.

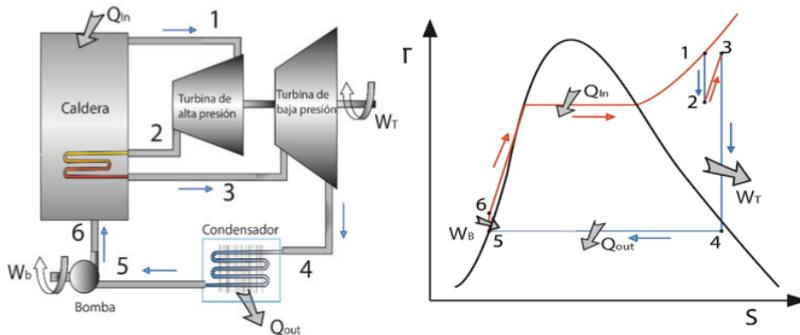


Figura 6. Esquema representativo y diagrama T-s del ciclo Rankine ideal con recalentamiento

Fuente: Elaborada por los autores.

1.3.4. Ciclo Rankine ideal regenerativo

El empleo de recalentamiento constituye un método mediante el cual se puede incrementar la temperatura media efectiva de calentamiento al aumentar la cantidad de calor añadida a altas temperaturas. En el ciclo Rankine ideal regenerativo se busca disminuir la cantidad de calor añadido para mejorar el rendimiento del ciclo; esto se puede lograr mediante un ciclo de regeneración o recuperación en el que el agua de alimentación se precalienta utilizando el vapor expandido.

En la figura 7 se muestra un ciclo Rankine ideal regenerativo. Para llevar a cabo este ciclo se necesita de unos intercambiadores de calor conocidos como calentadores de agua de alimentación, que no son más que una cámara de mezclado en la que el vapor extraído de la turbina se mezcla con el agua de alimentación proveniente de la bomba. Idealmente, el fluido que sale del calentador es líquido saturado a la presión del calentador.

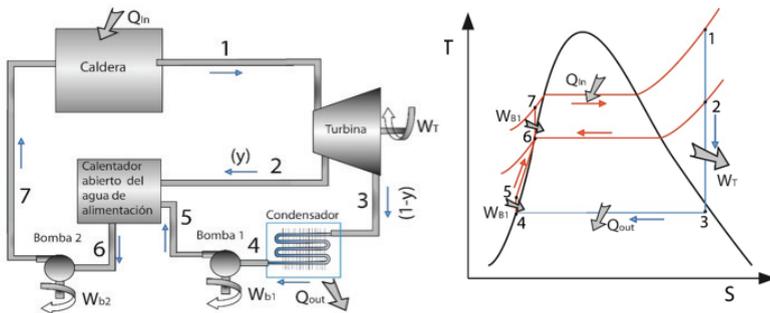


Figura 7. Esquema representativo y diagrama T-s del ciclo Rankine ideal regenerativo

Fuente: Elaborada por los autores.

El ciclo se expresa por la primera ley de la termodinámica, por unidad de vapor, y es calculado por medio de las ecuaciones (25), (26), (27) y (28).

$$q_{entrada} = q_{caldera} = (h_1 - h_7) \tag{25}$$

$$q_{salida} = (1 - y)(h_3 - h_4) \tag{26}$$

$$w_{salida} = w_{turbina} = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3) \tag{27}$$

$$w_{entrada} = w_{bomba1} + w_{bomba2} = (1 - y)(h_5 - h_4) + (h_7 - h_6) \tag{28}$$

donde $y = \frac{m_2}{m_1}$ es la fracción de vapor extraído de la turbina y h es la entalpia del fluido en la corriente especificada por cada número.

1.3.5. Ciclo Rankine ideal con cogeneración

En los anteriores ciclos, se efectúa la conversión de la energía térmica en trabajo, pero no todo el calor añadido en el ciclo se convierte en trabajo útil, solo una parte del calor se convierte en trabajo útil, el calor restante se libera en ríos, lagos, etc.

En este ciclo se utiliza una parte de la energía térmica que no se convierte en trabajo útil para alimentar unos dispositivos que requieren como entrada energía térmica, esta energía térmica que se utiliza se llama calor de proceso.

En la Figura 8 se muestra el esquema de una planta de cogeneración, se observa que una parte del vapor se extrae de la turbina a cierta presión, el resto del vapor se expande hasta la presión del condensador y después se retira calor a presión constante. Cuando se requiera una gran demanda de calor para el proceso, todo el vapor será enviado al calentador del proceso, por lo que no habrá el proceso de retiro de calor, entonces el calor de desecho es cero.

Para una planta de cogeneración las ecuaciones de energía están dadas por las ecuaciones (29), (30) y (31).

$$Q_{entrada} = Q_{caldera} = m_{11} (h_1 - h_{11}) \quad (29)$$

$$Q_{salida} = Q_{condensador} = m_6 (h_6 - h_8) \quad (30)$$

$$W_{salida} = W_{turbina} = m_3 (h_3 - h_5) + m_6 (h_5 - h_6) \quad (31)$$

Para una planta de cogeneración se calcula el factor de utilización ϵ_u a partir de la ecuación (32):

$$\epsilon_u = \frac{\text{Salida de trabajo neto} + \text{calor de proceso entregado}}{\text{Entrada total de calor}} = \frac{W_{neto} + Q_p}{Q_{entrada}} \quad (32)$$

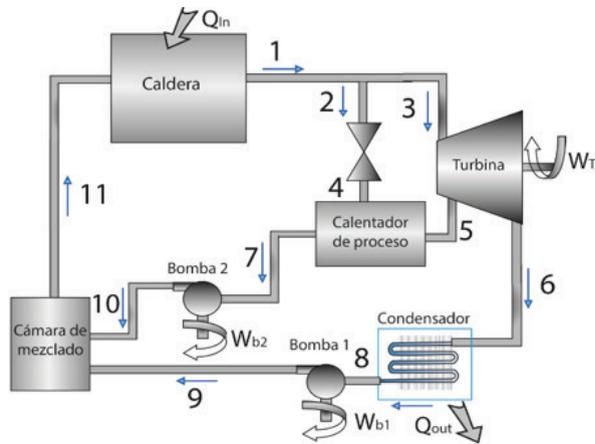


Figura 8. Esquema representativo del ciclo Rankine ideal con cogeneración

Fuente: Elaborada por los autores.

1.3.6. Ciclo Brayton: ideal para los motores de turbina de gas

El ciclo de Brayton constituye el ciclo básico para las plantas generadoras que funcionan con turbinas de gas. El ciclo Brayton se observa en los diagramas T-s y p-v de la figura 9. Se puede observar en estos diagramas que el ciclo de Brayton consiste en dos procesos reversibles a presión constante y dos procesos isentrópicos. En el caso de un ciclo estándar de aire de Brayton, para la unidad de masa se tienen las ecuaciones (33) y (34):

$$q_{\text{entrada}} = q_{23} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) \quad (33)$$

$$q_{\text{salida}} = q_{41} = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1) \quad (34)$$

El rendimiento térmico del ciclo Brayton es calculado mediante la ecuación (35):

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{neto}}}{q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (35)$$

Para los procesos isentrópicos se aplican las ecuaciones (36) y (37):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} \tag{36}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} \tag{37}$$

Pero siendo $P_2 = P_3$ y $P_4 = P_1$, resulta $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$ empleando estos resultados, se puede simplificar la ecuación (37) en la ecuación (38):

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \tag{38}$$

donde $r_p = P_2/P_1$ recibe el nombre de relación de presión y k , la relación de calores específicos. Como se puede observar, el rendimiento del ciclo estándar de aire Brayton es función únicamente de la relación de presión.

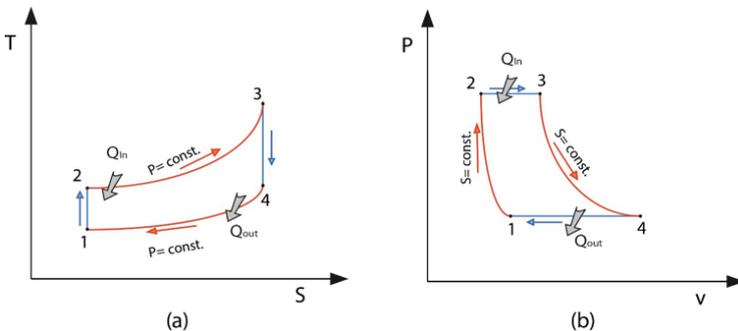


Figura 9. Diagrama T-S y diagrama P-v para un ciclo Brayton ideal

Fuente: Elaborada por los autores.

1.3.7. Ciclo combinado: Rankine ideal simple-Brayton ideal

En este ciclo se combina un ciclo de potencia de gas (Brayton) y un ciclo de potencia de vapor (Rankine), para obtener un rendimiento térmico mayor que el de cualquier de los ciclos individuales.

Podemos observar de la Figura 10, que los gases de escape de la turbina de gas no se expulsan, sino entran en un intercambiador de calor, como

contienen todavía mucha energía remanente, son aprovechados para calentar el vapor que entra a la turbina de vapor. El rendimiento térmico de un ciclo combinado se calcula a partir de la ecuación (39).

$$\eta_{ter} = \frac{\dot{W}_{turbina\ gas} + \dot{W}_{turbina\ vapor}}{\dot{Q}_{entrada}} \quad (39)$$

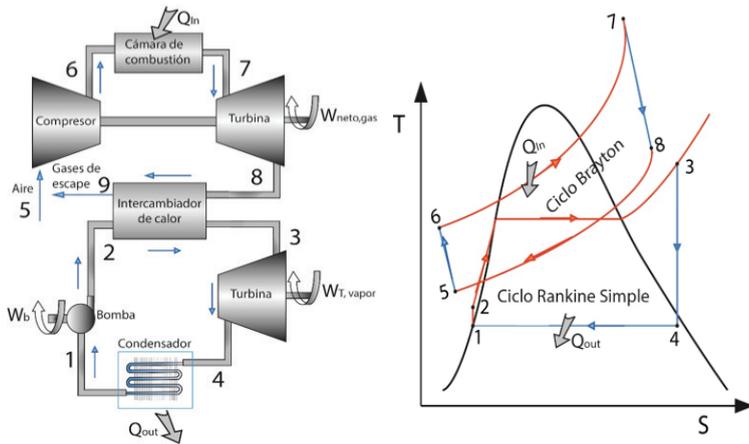


Figura 10. Esquema representativo y diagrama T-s del ciclo combinado

Fuente: Elaborada por los autores.

1.4. Ciclos termodinámicos de refrigeración

La refrigeración es un proceso que consiste en bajar o mantener el nivel de calor de un cuerpo o un espacio, pues hay que considerar que realmente el frío no existe y, por tanto, debe hablarse de mayor o menor cantidad de calor.

1.4.1. Ciclo de refrigeración de Carnot

El ciclo de Carnot representa una máquina térmica que trabaja entre dos focos de temperaturas diferentes, uno de alta T_H y otro de baja T_L . El ciclo comienza con la transferencia de calor al refrigerante, el cual es el fluido

de trabajo utilizado por sus características (temperatura de ebullición baja a presiones atmosféricas). Los cuatro procesos que lo conforman son reversibles, como se muestra en la figura 11. El primer proceso empieza desde punto 1 hasta el 2 (mezcla) en donde se transfiere calor Q_L del medio frío a una T_L al refrigerante para que este se evapore. En un refrigerador este calor sería entregado por los productos almacenados, el ciclo continúa del punto 2 al 3 (vapor saturado) con un aumento de la temperatura debido a que el refrigerante es comprimido isoentrópicamente hasta la temperatura del foco caliente T_H , de esta manera el refrigerante puede transferir el calor Q_H a una diferencia de temperatura infinitesimal siendo así un proceso reversible desde el punto 3 hasta el 4 (líquido saturado), y mientras se condensa el refrigerante, su temperatura permanecerá constante. Para cerrar el ciclo de Carnot, el refrigerante en estado líquido se expande isoentrópicamente del punto 4 al 1 por medio de una turbina; así descende la temperatura desde T_H hasta T_L regresando al inicio del ciclo en el punto 1 en un estado de mezcla pobre.

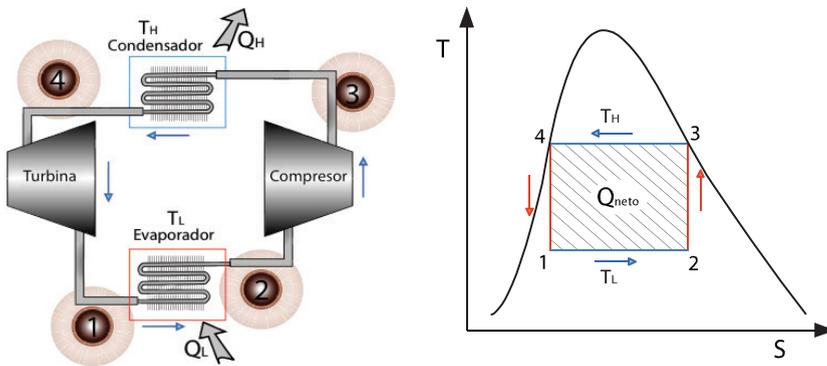


Figura 11. Esquema representativo y diagrama T-s de un sistema de refrigeración trabajando en el ciclo de refrigeración de Carnot

Fuente: Elaborada por los autores.

Si observamos el diagrama T-s, el área encerrada es el calor transferido, que es la resta de las áreas que forman las dos isothermas (4-3 y 1-2) barriendo verticalmente hasta la abscisa. La primera área ($T_H \cdot \Delta S$) es el calor cedido por

el refrigerante a la región de alta T_H y la segunda ($T_L \cdot \Delta S$) es el calor aportado al refrigerante por la región de baja T_L .

Los sistemas de refrigeración se comparan por medio del coeficiente de desempeño (COP); este es definido como el calor suministrado Q_{in} (el calor a remover) dividido por el trabajo neto W_{neto} (lo que cuesta), y se calcula por medio de la ecuación (40).

$$COP = \frac{Q_{in}}{W_{neto}} \quad (40)$$

O bien, puede ser calculado mediante la ecuación (41):

$$COP = \frac{T_L \Delta S}{(T_H - T_L) \Delta S} = \frac{T_L}{(T_H - T_L)} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \quad (41)$$

1.4.2 Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor

El ciclo invertido de Carnot puede aproximarse a un ciclo real, si cambiamos la turbina por una válvula de expansión, además podemos evitar que entre líquido al compresor si adicionamos calor al refrigerante hasta llevarlo a vapor saturado, como se muestra en la Figura 12. En un proceso isoentrópico se comprime el vapor saturado hasta vapor sobrecalentado alcanzando la isobárica del foco de alta. El pico de sobrecalentamiento muestra el trabajo adicional requerido para comprimir un vapor seco frente a uno húmedo.

(1-2) Transferencia de calor del foco de baja al refrigerante a presión constante en el evaporador (Proceso internamente reversible).

(2-3) Compresión isoentrópica en un compresor hasta la presión de alta.

(3-4) Transferencia de calor del refrigerante hacia el foco de alta a presión constante en el condensador (Proceso internamente reversible).

(4-1) Estrangulamiento en un dispositivo de expansión (Tubo capilar o válvula de expansión).

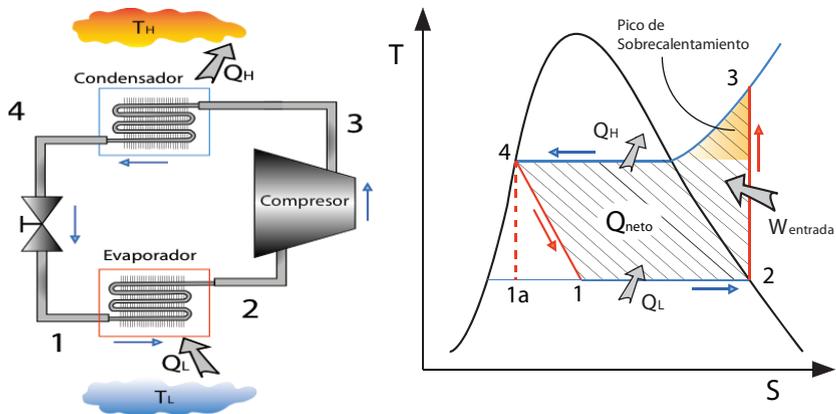


Figura 12. Esquema representativo y diagrama T-s de un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor

Fuente: Elaborada por los autores.

1.4.3. Sistemas de refrigeración en cascada

En situaciones donde la relación de compresión es muy alta, la eficiencia se reduce y el compresor empieza a deteriorarse poco a poco. Estas relaciones son muy altas cuando la temperatura de evaporación es muy baja con respecto a la de condensación. La solución para este problema es comprimir el gas en varias etapas. El uso de un intercambiador de calor para la unión de los ciclos A y B disminuye la temperatura de descarga del gas e incrementa la eficiencia.

En la Figura 13 se muestran dos ciclos de refrigeración por compresión de vapor unidos por un intercambiador de calor para ceder el calor del ciclo A hacia el ciclo B, esto es posible debido a que la temperatura de condensación del primer ciclo es mayor que la de evaporación del segundo, y a su vez la de condensación del ciclo B es mayor que la ambiente. El COP sistemas de refrigeración en cascada se calcula por medio de la ecuación (42).

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{W_{cycle A} + W_{cycle B}} \quad (42)$$

donde Q_e es el calor retirado.

El calor cedido por el ciclo A es igual al transferido al ciclo B, entonces la ecuación de conservación de la energía para el intercambiador de calor en función de los flujos másicos es la expresada en la ecuación (43):

$$\dot{m}_A(h_2 - h_3) = \dot{m}_B(h_5 - h_8) \quad (43)$$

O bien, puede expresarse por medio de la ecuación (44):

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{(h_5 - h_8)}{(h_2 - h_3)} \quad (44)$$

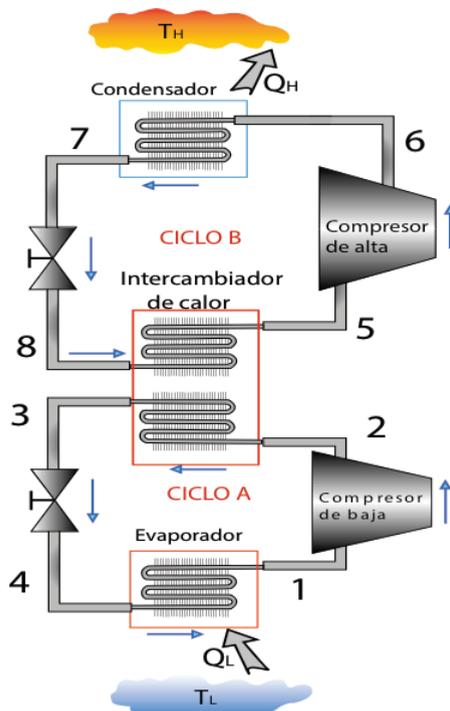


Figura 13. Esquema representativo de un sistema de refrigeración en cascada

Fuente: Elaborada por los autores

1.4.4. Sistemas de refrigeración multietapa

Cuando el refrigerante es el mismo en ambos ciclos en un sistema de refrigeración en cascada, cambia la configuración de los dispositivos y pasa a llamarse ciclo de refrigeración multietapas. El intercambiador de calor se reemplaza por una cámara de evaporación instantánea (cámara *flash*), además se agrega un intercambiador de calor de contacto directo (cámara de mezclado) como se muestra en la figura 14.

El refrigerante sale del condensador (5) como líquido saturado y pasa a la válvula de estrangulación (6); allí disminuye su presión y cambia su estado a mezcla saturada en la cámara de evaporación instantánea; el vapor saturado toma el camino hacia la cámara de mezclado y el líquido saturado $(1 - x) \dot{m}$ continúa el recorrido a la válvula de expansión (7) del ciclo inferior a ser nuevamente estrangulado y recoger el calor en el evaporador (8); finalmente, el refrigerante ingresa al compresor de baja como vapor saturado y sale como vapor sobrecalentado hacia la cámara de mezclado (2) donde se combina con el vapor que proviene de la cámara de vaporización instantánea; de la cámara de mezclado el vapor \dot{m} entra al compresor de alta para ser comprimido y transferir el calor a presión constante en el condensador hacia el ambiente.

La cantidad de vapor saturado es proporcional a su calidad (x), que se calcula con la ecuación (45). Por otra parte, el calor q_L que se está retirando está dado por el cambio de entalpía que multiplica al flujo másico como se observa en la ecuación (46):

$$x_6 = \frac{h_6 - h_f}{h_{fg}} \quad (45)$$

$$q_L = (1 - x_6) (h_1 - h_8) \quad (46)$$

Para determinar el coeficiente de desempeño de este ciclo de refrigeración es necesario encontrar el trabajo aportado W_{in} al ciclo, y que se calcula mediante la ecuación (47):

$$W_{in} = W_{\text{compresor de baja}} + W_{\text{compresor de alta}} \quad (47)$$

$$W_{in} = (1-x_6)(h_2-h_1) + (1)(h_4-h_3)$$

Por lo tanto, el coeficiente de desempeño queda expresado como lo muestra la ecuación (48):

$$COP = \frac{q_L}{w_{in3}} \quad (48)$$

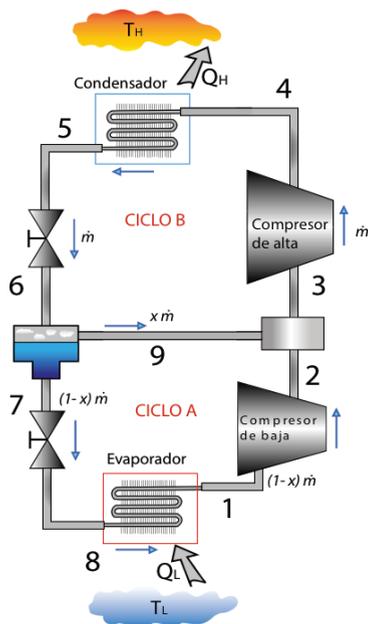


Figura 14. Esquema representativo de un sistema de refrigeración multietapas

Fuente: Elaborada por los autores.

1.4.5. Sistemas de refrigeración por absorción

El mayor gasto en un sistema de refrigeración por compresión es debido al trabajo del compresor que permite la transferencia del calor de una zona de baja temperatura a una zona de alta temperatura. De aquí nace la idea

de utilizar la propiedad de absorción de los gases por algunos fluidos para reemplazar el compresor y disminuir el trabajo requerido, además seguir realizando la misma función de poner el fluido en movimiento y entregar el calor a la zona de alta. El proceso comienza en el absorbedor, este es un recipiente lleno de agua y enfriado generalmente por medio de una torre de enfriamiento debido a que la absorción mejora a bajas temperatura, cuando el amoníaco sale del evaporador e ingresa al absorbedor reacciona con el agua en una reacción exotérmica y formando una disolución rica en amoníaco, como se muestra en la Figura 15.

La refrigeración por absorción termina siempre siendo costosa y con bajo desempeño, el COP para este sistema es calculado a partir de la ecuación (49):

$$COP_{\text{absorción}} = \frac{Q_L}{Q_{\text{generador}} + W_{\text{bomba, entrada}}} = \frac{Q_L}{Q_{\text{generador}}} \quad (49)$$

El trabajo de la bomba se desprecia debido a que es muy bajo.

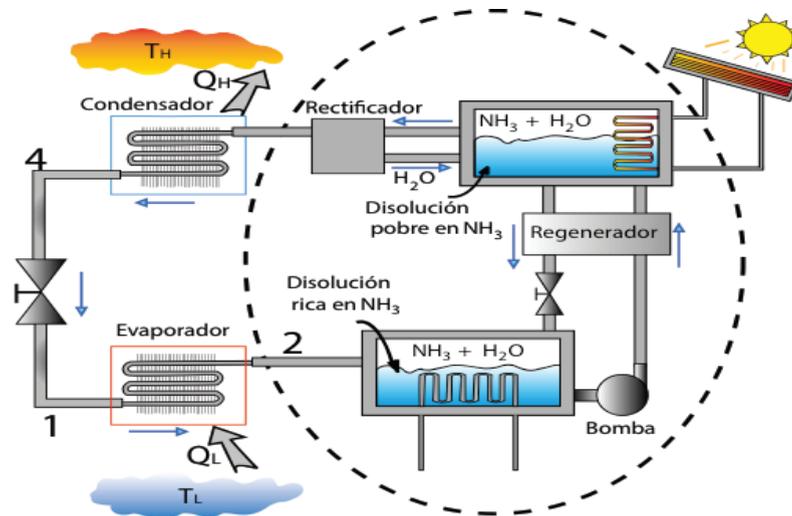


Figura 15. Esquema representativo de un sistema de refrigeración por absorción

Fuente: Elaborada por los autores.

1.5. Procesos de acondicionamiento de aire

En ingeniería se estudian varias mezclas de gas-vapor, una de estas es la de aire-vapor de agua, que es la más común en la práctica. También se estudia el acondicionamiento de aire, que es la principal área de trabajo de las mezclas de aire-vapor de agua. El vapor normalmente es una sustancia en fase gaseosa que se encuentra debajo de la temperatura crítica, por ende, el límite inferior es la curva de saturación para vapor saturado. Al alcanzar la curva de saturación el vapor empieza el proceso de condensación. El estudio de sistemas consistentes en aire seco y agua se conoce como psicrometría.

La psicrometría o higrometría utiliza las propiedades termodinámicas para analizar las condiciones y los procesos relacionados con la humedad y temperatura del aire. El aire atmosférico o aire húmedo está formado por un porcentaje de vapor de agua llamado humedad y aire seco que se trata como si fuera un componente puro. El aire es una mezcla de varios gases que en mayor parte está compuesto por oxígeno, nitrógeno y otros más en porcentajes menores al 1%. La cantidad de vapor de agua en el aire es fundamental en el acondicionamiento de aire debido al confort que se busca. El aire saturado es una mezcla de aire seco y vapor de agua saturado. La densidad de la mezcla de aire seco y el vapor de agua (aire atmosférico) está dada por la ecuación (50).

$$\rho = \frac{n\bar{R}T}{v} = \frac{m(\bar{R}/M)T}{v} \quad (50)$$

Los componentes de la mezcla se tratan individualmente en el volumen V a la temperatura T de la mezcla y como si ejercieran una parte de la presión, por lo que las ecuaciones de densidad son expresadas mediante las ecuaciones (51) y (52):

$$\rho_a = \frac{n_a\bar{R}T}{v} = \frac{m_a(\bar{R}/M_a)T}{v} \quad (51)$$

$$\rho_v = \frac{n_v\bar{R}T}{v} = \frac{m_v(\bar{R}/M_v)T}{v} \quad (52)$$

El rango de temperaturas a trabajar en el campo de la industria para el acondicionamiento de aire comienza de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ normalmente². Con la consideración del aire seco como un gas ideal, coeficiente de capacidad calorífica a presión constante (C_p) y un γ de valor constante de $1.005\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ [$0.240\text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$] obtenemos un error menor al 0.2% en el cálculo de su entalpía. Luego tomamos la temperatura de referencia a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; la entalpía y el cambio de entalpía de aire seco se determinan por medio de las ecuaciones (53) y (54):

$$h_{\text{aire seco}} = C_p T = \left(1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}\right) T \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}\right) \quad (53)$$

$$\Delta h_{\text{aire seco}} = C_p T = \left(1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}\right) T \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}\right) \quad (54)$$

La entalpía del vapor de agua tiene un comportamiento constante a temperaturas menores de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. El vapor de agua es un gas ideal y su entalpía es una función exclusiva de la temperatura y puede tomarse igual a la entalpía del vapor saturado a la misma temperatura (T aire atmosférico); la entalpía del vapor saturado se calcula a partir de la ecuación (55):

$$h_v(T, \text{bajo } P) \cong h_g(T) \quad (55)$$

1.5.1. Humedad específica, humedad relativa y entalpía de mezcla

Una muestra de aire húmedo puede ser estudiada a partir de su composición de diferentes maneras. La mezcla de gas-vapor se puede expresar en moles de aire seco y de vapor de agua, también podemos utilizar las fracciones molares de cada componente de la mezcla. La más común es la relación de masas entre el aire seco y el vapor de agua.

La humedad específica (ω), es el resultado de la división de la masa del vapor de agua entre la masa del aire seco, como lo muestra la ecuación (56):

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (56)$$

² ÇENGEL, Yunus y Boles, Michael, Termodinámica 7^{ma} ed. México: McGraw-Hill, 2012. P. 739.

La humedad específica también se calcula a partir de la ecuación (57):

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v P_v V / \bar{R}T}{M_a P_a V / \bar{R}T} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a} \quad (57)$$

O bien, por medio de la ecuación (58):

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (58)$$

Sustituyendo $P_a = P - P_v$, donde P es la presión del aire atmosférico y teniendo en cuenta que el cociente entre los pesos moleculares del agua y el aire seco (M_v/M_a) vale aproximadamente 0,622:

La cantidad de humedad en el aire está unida al confort, y la relación utilizada para cuantificarla es la humedad relativa calculada mediante la ecuación (59). Esta expresa la cantidad de masa de vapor en el aire (m_v) dividida entre la cantidad de masa de vapor que puede contener el aire (m_g) a la temperatura que se encuentre (temperatura ambiente si es abierto a la atmosfera):

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / \bar{R}T}{P_g V / \bar{R}T} = \frac{P_v}{P_g} \quad (59)$$

donde P_g es la presión de saturación del agua a temperatura ambiente, como lo muestra la ecuación (60):

$$P_g = P_{\text{sat a Tamb}} \quad (60)$$

Si se reemplaza la ecuación (59) en la ecuación (58), la humedad específica se calcula a partir de la ecuación (61):

$$\omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (61)$$

La adición de la entalpía del vapor de agua y de la entalpía del aire seco conforman la entalpía total del aire atmosférico, como se expresa en la ecuación (62).

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (62)$$

Dividiendo la entalpía total entre la masa del aire seco se obtiene la ecuación (63).

$$H = \frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + \omega h_v \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg de aire seco}} \right) \quad (63)$$

La temperatura ordinaria del aire atmosférico se conoce como la temperatura de bulbo seco para diferenciarla de otras formas de temperatura, como por ejemplo, la temperatura de punto de rocío T_{pr} , que es la temperatura a la que inicia la condensación si el aire se enfría a presión constante.

El estado del aire atmosférico a una presión especificada se establece por completo mediante dos propiedades intensivas independientes. El resto las podemos sacar de unas gráficas, dichas gráficas reciben el nombre de cartas psicrométricas, como se muestra en la Figura 16.

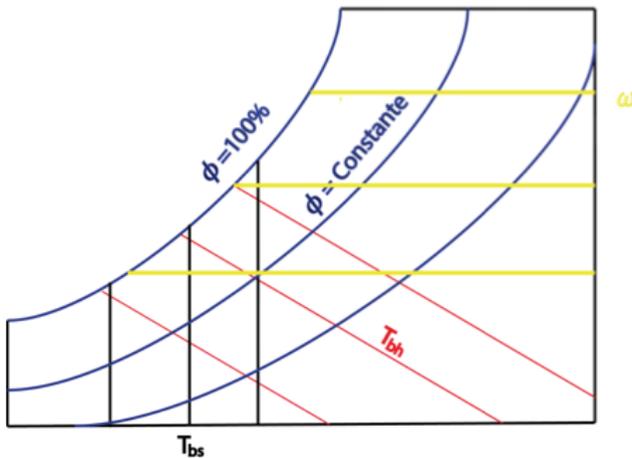


Figura 16. Esquema de una carta psicrométrica

Fuente: Elaborada por autores.

Los procesos de acondicionamiento de aire pueden modelarse como procesos de flujo estacionario, por lo tanto, el balance de energía y los balances de masa para el aire seco y el agua son calculados a partir de las ecuaciones (64), (65) y (66).

Balance de masa para el aire seco:

$$\sum_{Ent} \dot{m}_a = \sum_{Sal} \dot{m}_a \quad (64)$$

Balance de masa para el agua:

$$\sum_{Ent} \dot{m}_w = \sum_{Sal} \dot{m}_w \quad \text{o} \quad \sum_{Ent} \dot{m}_a \omega = \sum_{Sal} \dot{m}_a \omega \quad (65)$$

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{Ent} \dot{m}h = \dot{Q}_{sal} + \dot{W}_{sal} + \sum_{Sal} \dot{m}h \quad (66)$$

1.5.2. Calentamiento simple

En este proceso aumenta la temperatura de bulbo seco mediante una bomba de calor o una resistencia eléctrica, es un proceso a presión constante y humedad específica constante. Figura 17 presenta un serpentín de calentamiento que aumenta la temperatura de bulbo seco y por ende disminuye la humedad relativa.

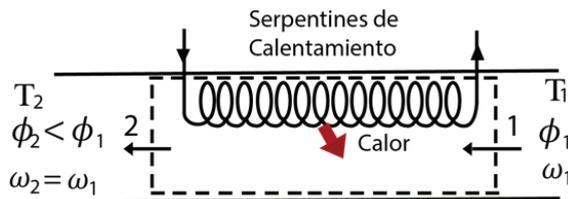


Figura 17. Esquema representativo de un proceso de calentamiento de aire

Fuente: Elaborada por los autores.

1.5.3. Calentamiento con humidificación

Si la humedad relativa es muy baja después del calentamiento del aire puede causar resequead en la piel y dificultad para respirar, se introduce vapor en la sección de humidificación produciendo un razonable aumento en la humedad relativa con calentamiento adicional, como se muestra en la Figura 18.

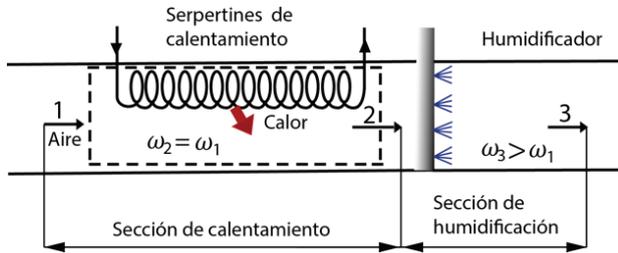


Figura 18. Esquema representativo de un proceso de calentamiento de aire con humidificación

Fuente: Elaborada por los autores.

1.5.4. Enfriamiento simple

Un proceso de enfriamiento simple a humedad específica constante es similar al proceso de calentamiento, excepto que la temperatura de bulbo seco disminuye y la humedad relativa aumenta durante un proceso. Este proceso se muestra en la Figura 19.

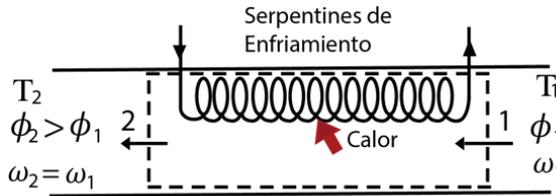


Figura 19. Esquema representativo de un proceso de enfriamiento de aire

Fuente: Elaborada por los autores.

1.5.5. Enfriamiento con deshumidificación

La humedad relativa específica del aire permanece constante durante un proceso de enfriamiento simple, pero su humedad relativa aumenta. Si la humedad relativa alcanza niveles extremadamente altos, tal vez sea necesario eliminar algo de humedad en el aire, es decir, deshumidificarlo. Para esto es necesario enfriar el aire por debajo de su temperatura de punto de rocío, como lo muestra la Figura 20.

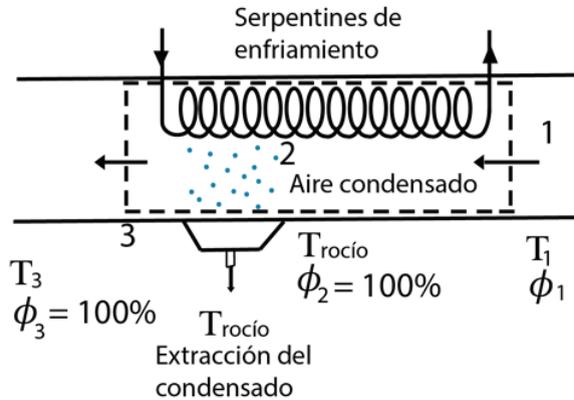


Figura 20. Esquema representativo de un proceso de enfriamiento simple con deshumidificación
Fuente: Elaborada por los autores.

1.5.6. Torres de enfriamiento

Se utilizan para enfriar grandes caudales de agua. El agua caliente entra por la parte superior de la torre, como se muestra en la Figura 21, denominado punto 3 y se rocía en este flujo de aire; las gotas de agua caen por la influencia de la gravedad. Una parte del agua se evapora por lo cual debe reponerse el agua perdida y el restante del agua se enfría. Un ventilador ayuda en el flujo del aire.

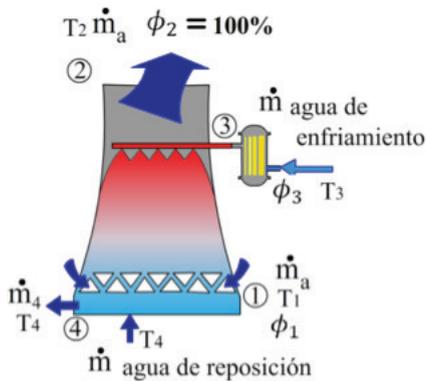


Figura 21. Esquema representativo de una torre de enfriamiento
Fuente: Elaborada por los autores.

Desarrollo metodológico

Para el diseño de un laboratorio virtual es necesario aplicar el método sistémico de tal forma que podamos ver al proceso como un conjunto de componentes que interactúan entre sí para conseguir un objetivo. El objetivo corresponde al diseño e implementación del laboratorio con base en un conjunto de componentes definidos formalmente, que se muestran en la Figura 22.

Figura 22. Diagrama de flujo que describe la metodología utilizada para el diseño e implementación del laboratorio virtual de termodinámica.

Fuente: Elaborada por los autores.



2.1. Revisión de la literatura

Se realizó una investigación previa y revisión bibliográfica para el desarrollo de las aplicaciones, se tomaron como referencia varios textos de termodinámica que se encuentran relacionados en la sección de referencias bibliográficas.

2.2. Programación

Las aplicaciones se desarrollaron en los software Matlab® y Microsoft Visual Studio®; para realizar estas aplicaciones se necesitaron de unas herramientas y controles.

2.2.1. Herramientas y controles utilizados en el entorno de Microsoft Visual Studio®

Al desarrollar una aplicación en Visual Basic, se requiere trabajar continuamente con objetos. Se pueden utilizar los objetos proporcionados por Visual Basic, como controles, formularios y objetos de acceso a datos. También se puede trabajar con objetos de otras aplicaciones en la aplicación de Visual Basic. De hecho, se pueden crear objetos propios y añadirles propiedades y métodos adicionales. Los objetos actúan como unidades de creación prefabricadas para programas: permiten escribir una porción de código y utilizarla una y otra vez³.

2.2.1.1. Objetos

Los objetos que se utilizan en Visual Basic proceden de orígenes internos y externos. Entre los ejemplos de objetos internos se incluyen los objetos y clases intrínsecos en el proyecto; entre los ejemplos de objeto externos se incluyen los ensamblados y los objetos COM (Interface binaria estándar para componentes de programas).

Los objetos *intrínsecos* (o *integrados*) son los que proporciona Visual Basic de forma nativa. Entre estos se incluyen los tipos escalares primitivos como **Integer** y **Double**, así como los tipos **Array** y **String**. No hace falta crear referencias a objetos internos antes de utilizarlos en el proyecto. Otros

³ Objetos en Visual Basic [https://msdn.microsoft.com/es-es/library/tyd4tfw8\(v=vs.90\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/library/tyd4tfw8(v=vs.90).aspx) [Consultada: 20 de agosto de 2015].

objetos internos son instancias de clases en el proyecto actual. Estas clases pueden utilizarse siempre que sean necesarias dentro del proyecto y pueden estar disponibles para otras aplicaciones cuando se crea un ensamblado.

Los objetos externos son los que proceden de otros proyectos o ensamblados que no están disponibles en el proyecto de manera predeterminada. Es necesario crear referencias de proyecto a los objetos externos para poder utilizarlos en el proyecto.

Los ensamblados son el origen más común de objetos para las aplicaciones de Visual Basic. .NET Framework incluye ensamblados que contienen objetos que se utilizan habitualmente. Algunos objetos en .NET Framework se tratan como objetos intrínsecos, pero la mayoría de los ensamblados deben importarse de forma explícita mediante la instrucción **Imports** antes de poder aprovecharlos. Cualquier lenguaje compatible con Common Language Specification (CLS), como Visual Basic o Visual C#, puede crear y usar ensamblados.

En el pasado, los componentes COM eran el origen tradicional de objetos para programadores de Visual Basic, pero actualmente los ensamblados de .NET Framework constituyen una opción mejor para los nuevos objetos. Todavía se pueden utilizar los componentes COM existentes en las aplicaciones; no obstante, el acceso a los objetos COM debe realizarse mediante clases de interoperabilidad de .NET Framework. El acceso a una biblioteca COM requiere el uso de un ensamblado de interoperabilidad que contenga clases de interoperabilidad para cada clase COM definida en la biblioteca⁴.

2.2.1.2. Controles en Visual Basic

En Visual Basic existen tres categorías generales de controles: controles intrínsecos, controles ActiveX y objetos insertables.

2.2.1.2.1. Controles intrínsecos. Estos controles se encuentran dentro del archivo ejecutable de Visual Basic. Los controles intrínsecos están siempre incluidos en el cuadro de herramientas, a diferencia de los controles Activex, que se pueden quitar o agregar al cuadro de herramientas. En la tabla 1 se muestra una lista de los controles intrínsecos.

⁴ Objetos de Visual Basic y otros orígenes: [https://msdn.microsoft.com/eses/library/0s5xx10c\(v=vs.90\).aspx](https://msdn.microsoft.com/eses/library/0s5xx10c(v=vs.90).aspx) [Consultada: 20 de agosto de 2015].

Nombre de control	Nombre de clase	Descripción	Imagen
Casilla de verificación	CheckBox	Presenta una opción de tipo Verdadero o Falso.	 CheckBox
Cuadro combinado	ComboBox	Combina un cuadro de texto y otro de lista.	 ComboBox
Botón de comando	CommandButton	Ejecuta un comando o una acción cuando el usuario hace clic en él.	 Button
Datos	Data	Permite conectar una base de datos existentes y presentar en ella información introduciéndola en los formularios correspondientes	 BindingSource
Cuadro de lista de directorios	DirListBox	Presenta directorios y rutas de acceso.	 DirectorySearcher
Cuadro de lista de archivos	FileListBox	Presenta una lista de archivos.	 FileSystemWatcher
Cuadro de lista de unidades	DriveListBox	Presenta una lista de unidades de disco válidas.	 DirectoryEntry
Marco	Frame	Proporciona un contenedor visual y funcional para los controles.	 Panel
Barras de desplazamiento horizontal y vertical	HScrollBar y VScrollBar	Permite que un usuario agregue barras de desplazamiento a controles que no las tienen de forma automática.	 HScrollBar
Imagen	Image	Presenta mapas de bits, íconos o metaarchivos de Windows, archivos JPEG o GIF, y actúa como un botón de comando.	 PictureBox
Etiqueta	Label	Texto estático o no modificable.	 Label

Línea	Line	Agrega un segmento de línea recta a un formulario.	 LineShape
Cuadro de lista	ListBox	Presenta una lista de elementos entre los que el usuario puede elegir.	 ListBox
Contenedor OLE	OLE	Incrusta datos en una aplicación de Visual Basic.	
Botón de opción	OptionButton	El control OptionButton es parte de un grupo de opciones con otros botones de opción.	 RadioButton
Cuadro de imagen	PictureBox	Presenta mapas de bits, íconos o metaarchivos de Windows y otros tipos de archivos gráficos compatibles. También presenta texto o actúa como contenedor visual para otros controles.	 PictureBox
Forma	Shape	Agrega un rectángulo, un cuadrado, una elipse o un círculo a un formulario, cuadro de imagen.	 OvalShape  RectangleShape
Cuadro de texto	TextBox	Proporciona un área para escribir texto.	 TextBox

Tabla 1. Tabla de controles intrínsecos de Visual Basic

Fuente: Adaptado de [https://msdn.microsoft.com/es-es/library/0s5xx10c\(v=vs.90\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/library/0s5xx10c(v=vs.90).aspx)

2.2.1.2.2. Controles ActiveX. Son aquellos controles que existen como archivos independientes con extensión nombre de archivo **.ocx**. Entre éstos se incluyen los controles disponibles en todas las ediciones de Visual Basic (controles cuadrícula, cuadro combinado y lista enlazados a datos y varios más) y los que sólo están disponibles en la Edición Profesional y la Edición Empresarial (como ListView, Toolbar, Animation y Tabbed Dialog). A estos también se suman los controles Activex de otros fabricantes, como se muestra en la Tabla 2.

Nombre de control	Nombre de clase	Descripción	Imagen
Control de datos ADO	ADODC	Crea una conexión a una base de datos mediante ADO asignable a la propiedad DataSource de otros controles, como el control DataGrid.	 DataSet
Diálogo común	CommonDialog	Proporciona un conjunto de cuadros de diálogo estándar para operaciones como abrir y guardar archivos, establecer opciones de impresión y seleccionar colores y fuentes.	 FolderBrowserDialog  FontDialog  OpenFileDialog  SaveFileDialog
Cuadro combinado enlazado a datos	DataGrid	Proporciona la mayoría de las opciones del control ComboBox estándar, así como mayor capacidad de acceso a datos.	
Cuadrícula Apex enlazada a datos	DataGridView	Control con apariencia de una hoja de cálculo vinculado a un origen de datos como un control de datos ADO. Es posible la lectura y la modificación del <i>recordset</i> .	 DataGridView
Cuadro de lista enlazado a datos	DataList	Proporciona la mayoría de las características del control ListBox estándar, así como mayor capacidad de acceso a datos.	
FlexGrid de Microsoft	MSFlexGrid	Control con apariencia de hoja de cálculo de solo lectura que se puede vincular al diseñador de entorno de datos para mostrar <i>recordsets</i> jerárquicos.	

Tabla 2. Lista de controles Activex en Visual Basic

Fuente: Adaptado de [https://msdn.microsoft.com/es-es/library/0s5xx10c\(v=vs.90\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/library/0s5xx10c(v=vs.90).aspx)

2.2.2. Herramientas y controles utilizados en el entorno de Matlab®

Una de las tantas herramientas con la que cuenta MatLab es la creación de interfaces gráficas de usuario GUI (*Graphical User Interface*, en inglés), usando Guide (*Graphical User Interface Development Environment*). La forma de implementar las GUI con MatLab es crear los objetos y definir las acciones que cada uno va a realizar. Al usar Guide se obtienen dos archivos:

- Un archivo *.fig* Contiene la descripción de los componentes que contiene la interfase.
- Un archivo *.m* Contiene las funciones y controles del GUI, así como el callback.

Un callback se define como la acción que llevará a cabo un objeto de la GUI cuando el usuario lo active, por ejemplo, suponga que en una ventana existe un botón que al presionarlo ejecutará una serie de acciones; a eso se le conoce como la función callback.

Para crear una GUI en MatLab usamos Guide, cuyo entorno de desarrollo se observa en la Figura 23: en la parte superior se encuentran los menús y opciones de Guide, en la parte izquierda se aprecian los diferentes controles, como lo muestra la tabla 3, y en la parte central está el área de diseño donde van los controles a usar.

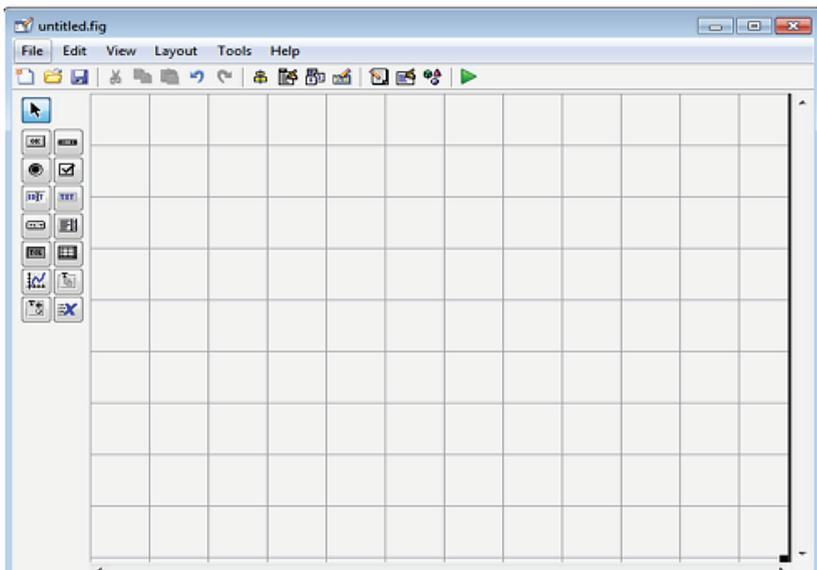


Figura 23. Entorno de desarrollo Guide

Fuente: Elaborada por los autores.

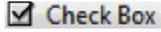
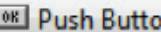
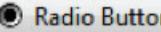
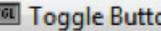
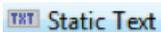
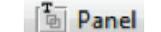
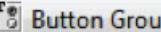
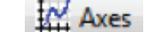
Control	Valor del estilo	Descripción	Imagen
Check box	<i>checkbox</i>	Indica el estado de una opción o atributo.	
Edit Text	<i>edit</i>	Para editar texto.	
Pop-up Menu	<i>popupmenu</i>	Provee una lista de opciones.	
List Box	<i>listbox</i>	Muestra una lista deslizable.	
Push Button	<i>pushbutton</i>	Invoca un evento inmediatamente.	
Radio Button	<i>radio</i>	Indica una opción que puede ser seleccionada.	
Toggle Button	<i>togglebutton</i>	Solo dos estados, <i>on</i> u <i>off</i> .	
Slider	<i>slider</i>	Usado para representar un rango de valores.	
Static Text	<i>text</i>	Muestra un <i>string</i> de texto en una caja.	
Panel button		Agrupar botones como un grupo.	
Button Group		Permite exclusividad de selección con los <i>radio button</i> .	
Axes		Crea un área para gráficas.	
Property Inspector		Cada control cuenta con diferentes propiedades, y es aquí donde cabe cambiar: el color, el nombre, el valor, el <i>callback</i> entre otros.	

Tabla 3. Tabla de componentes principales de MatLab

Fuente: Adaptado de https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/11/MATLAB_GUIDE.pdf

2.2.2.1. Programación en MatLab®

Tanto los valores de las propiedades de los elementos (color, valor, posición, *string*, entre otras) como las de las variables transitorias del programa se almacenan en una estructura, desde donde van a ser accedidos mediante un único y común identificador para todos. El identificador se asigna en:

```
handles.output = hObject;
```

handles es nuestro identificador para los datos de la aplicación. Esta definición de identificador es salvada con la siguiente instrucción:

```
guidata(hObject, handles);
```

guidata es la sentencia garantiza que cualquier cambio o asignación de propiedades o variables quede almacenado.

La asignación u obtención de valores de los componentes se realiza mediante las sentencias *get* y *set*. Por ejemplo, supongamos que la variable *utpl* tenga el valor del Slider se escribe:

```
utpl = get(handles.slider1, 'Value');
```

Siempre se obtienen los datos a través de los identificadores *handles*.

2.2.3. Metodología para la elaboración de las aplicaciones

Para el *software* del módulo de las propiedades de las sustancias puras se utilizó la metodología que se puede observar en la figura 24, en donde lo más importante para tener consideración es la creación de la base de datos.

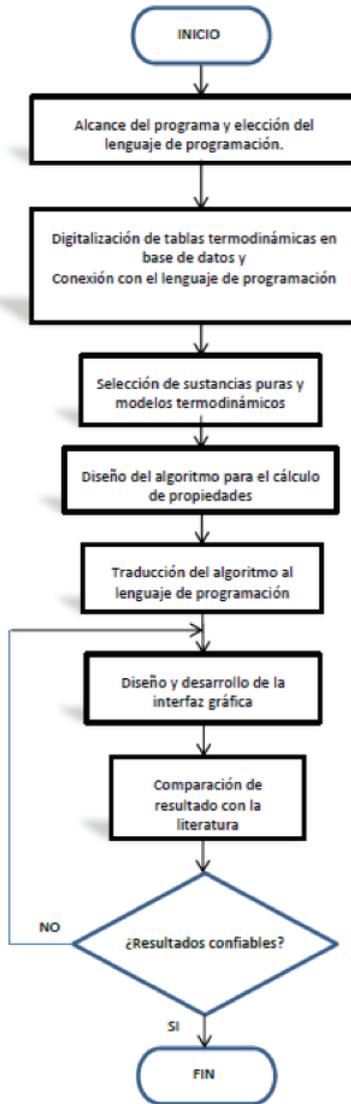


Figura 24. Representación de la metodología para desarrollar el *software* del módulo de las propiedades de las sustancias puras

Fuente: Elaborada por los autores.

Para el desarrollo de las demás aplicaciones de los diferentes módulos se utilizó la siguiente metodología, que se puede observar en la figura 25:

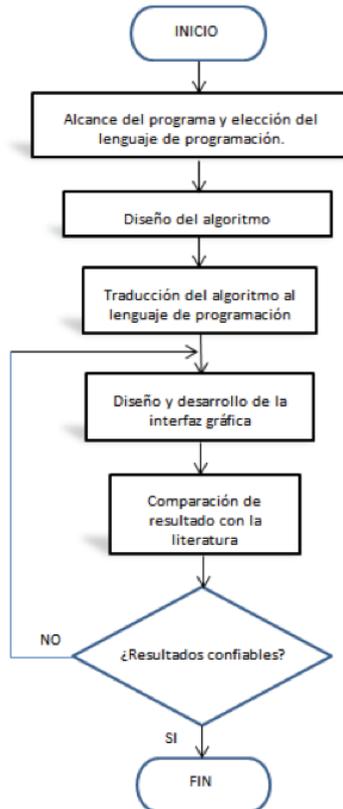


Figura 25. Diagrama de flujo que describe la metodología para desarrollar las aplicaciones de los módulos del laboratorio virtual de termodinámica

Fuente: Autores.

2.3. Diseño del laboratorio virtual en la plataforma Sicvi

El montaje del contenido de los módulos a la plataforma del Sicvi-567 se llevará a cabo mediante el lenguaje HTML (*HyperText Markup Language*), que es un lenguaje de marcado para la elaboración de páginas web.

2.4 Socialización Del Laboratorio Virtual

En la socialización del laboratorio virtual, se llevará a cabo dos encuestas (antes de usar y después de usar el programa) para evaluar el impacto del laboratorio virtual en los estudiantes de la asignatura de termodinámica, las encuestas se muestran en los anexos A y B.

Para validar la confiabilidad del instrumento de medición, en este caso las encuestas, se utiliza el método de consistencia interna basado en el alfa de Cronbach.

El alfa de Cronbach usa la correlación promedio entre los ítems de una prueba si estos están estandarizados con una desviación estándar de uno; o en la covarianza promedio entre los ítems de una escala, si los ítems no están estandarizados.⁵

Esta técnica supone que los ítems están correlacionados positivamente unos con otros, debido a que miden en cierto grado una entidad común.

El coeficiente alfa de Cronbach puede ser calculado por medio de la ecuación (67).

$$\alpha = \left[\frac{k}{k-1} \right] \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^k s_i^2}{s_t^2} \right] \quad (67)$$

donde,

$\sum_{i=1}^k s_i^2$: es la suma de las varianzas de cada ítem

s_t^2 : es la varianza total de los valores totales observados

k : es el número de preguntas o ítems.

La varianza se calcula mediante la ecuación (68):

⁵ Alpha de Cronbach [en línea]. < <http://es.slideshare.net/cmssuh/alpha-de-cronbach>>. [Consultada: 15 de agosto de 2015].

$$s_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (68)$$

donde,

X_i : es cada dato

n : el número de datos

\bar{X} : la media aritmética de los datos.

El coeficiente alfa de Cronbach requiere una sola administración del instrumento de medición y produce valores que oscilan entre 0 y 1. El valor mínimo aceptable para el coeficiente alfa de Cronbach es 0.7; un valor superior a 0.7 revela una fuerte relación entre las preguntas, mientras que un valor inferior revela una débil relación entre ellas.⁶

6 J. Bojórquez, L. López, M. Hernández y E. Jiménez, "Utilización del alfa de Cronbach para validar la confiabilidad de un instrumento de medición de satisfacción del estudiante en el uso del *software* Minitab", trabajo presentado en *11th LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, Cancún, México, 2013.

Módulos informáticos desarrollados

El laboratorio virtual en Termodinámica consta de varios módulos y cada módulo tiene diversos subtemas, como se muestra en la figura 26, destinados a proporcionar una comprensión conceptual de temas relacionados con esta materia.

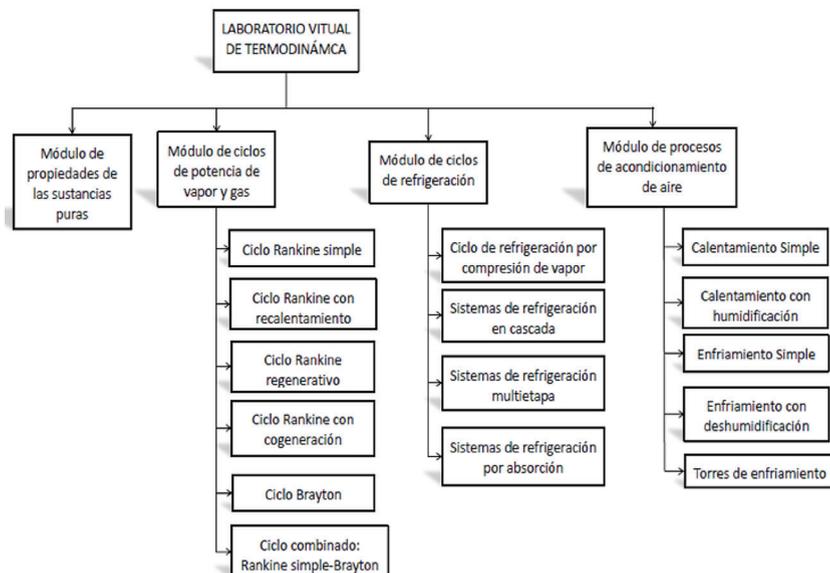


Figura 26. Módulos que contiene el laboratorio virtual en termodinámica

Fuente: Elaborada por los autores.

• **Propiedades de las sustancias puras**

Con este módulo se pueden calcular las propiedades termodinámicas de diferentes sustancias, solamente especificando P y/o T con otra propiedad (v,h,u,s), además de consultar las principales tablas fisicoquímicas.

• **Ciclos de potencia de vapor y gas**

El módulo comprende: Ciclo Rankine simple, Ciclo Rankine con recalentamiento, Ciclo Rankine regenerativo, Ciclo Rankine con cogeneración, Ciclo Brayton y Ciclo combinado: Rankine simple-Brayton.

El objetivo de este módulo es analizar los ciclos de potencia de vapor y gas para establecer el conjunto de parámetros de tal forma que el ciclo sea lo más eficiente posible, además de graficar los resultados en el diagrama T-s para la aplicación de Rankine simple y Rankine con regeneración.

• **Ciclos de refrigeración**

El módulo comprende: Ciclo de refrigeración por compresión de vapor, Sistemas de refrigeración en cascada, sistemas de refrigeración multietapas y sistemas de refrigeración por absorción.

El objetivo principal del módulo es analizar los ciclos de refrigeración para establecer el conjunto de parámetros para que el equipo de refrigeración tenga el mejor desempeño posible, con la posibilidad de observar los resultados en el diagrama T-S. Para lograr esto hay que mencionar los componentes básicos de los que se componen y sin los cuales es imposible que se lleve a cabo:

- √ El Compresor
- √ El Condensador
- √ La válvula de expansión
- √ El evaporador

• Procesos de acondicionamiento de aire

El módulo comprende: Calentamiento simple, Calentamiento con humidificación, Enfriamiento simple, Enfriamiento con deshumidificación y Torres de enfriamiento.

La finalidad del módulo es comprender los procesos de acondicionamiento de aire y el entendimiento de la carta psicométrica.

3.1 Contenido módulo propiedades de las sustancias puras

3.1.1. Aplicación Pure Substance V 1.0

El cálculo de las propiedades termodinámicas es esencial al momento de analizar un sistema termodinámico abierto o cerrado, la forma más rápida de calcular las propiedades es por las tablas de propiedades termodinámicas las cuales son generadas al resolver ecuaciones diferenciales que relacionan el comportamiento de estas propiedades en condiciones especiales, el análisis matemático es extenso y se le presenta al estudiante normalmente después de haber conocido la mayoría de la temática que abarca la primera y segunda ley de la termodinámica. Para los gases el trato es distinto, debido a que estos se han estudiado de muchas formas hasta establecerse diferentes modelos matemáticos o ecuaciones de estado, una de ellas la ecuación de Van der Waals que se resuelve por medio del método Newton-Raphson y entrega resultados con un bajo porcentaje de error.

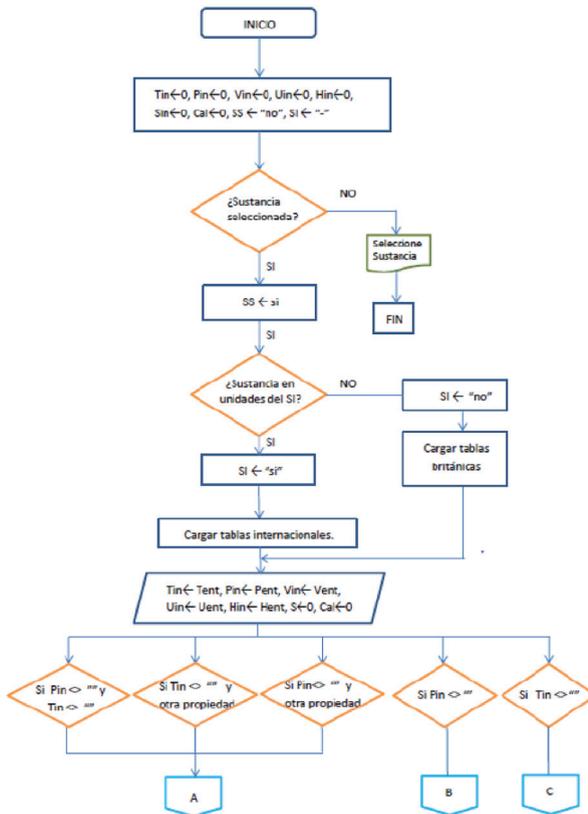
3.1.1.1. Desarrollo del algoritmo

El código realizado se basó en la lógica que se desarrolló en el algoritmo que presenta la figura 27 con las variables principales Tin , Pin , Vin , Uin , Hin , Sin , Cal , que son definidas como *decimals* (decimales), y las variables secundarias SS y SI de tipo *String* (cadena de texto) que permiten la validación de los requisitos para la obtención de los cálculos.

El tipo de datos Decimal proporciona el número máximo de dígitos significativos para un número. Admite hasta 29 dígitos significativos y puede

representar valores que superan 7.9228×10^{28} . Es especialmente cómodo para cálculos, por ejemplo, financieros, que requieren un gran número de dígitos pero no puede tolerar errores del redondeo.⁷

En esta aplicación se creó un algoritmo basado para consultar las tablas de propiedades termodinámicas, buscar los valores ingresados y hacer interpolaciones sencillas, dobles y triples cuando sea necesario hallar el resultado y procesarlo para su visualización de forma gráfica. La selección de las sustancias puras y gases se presenta detalladamente en el anexo B.



⁷ Decimal (tipo de datos, Visual Basic): <https://msdn.microsoft.com/es-co/library/xtba3z33.aspx> [Consultada: 21 de agosto de 2015].

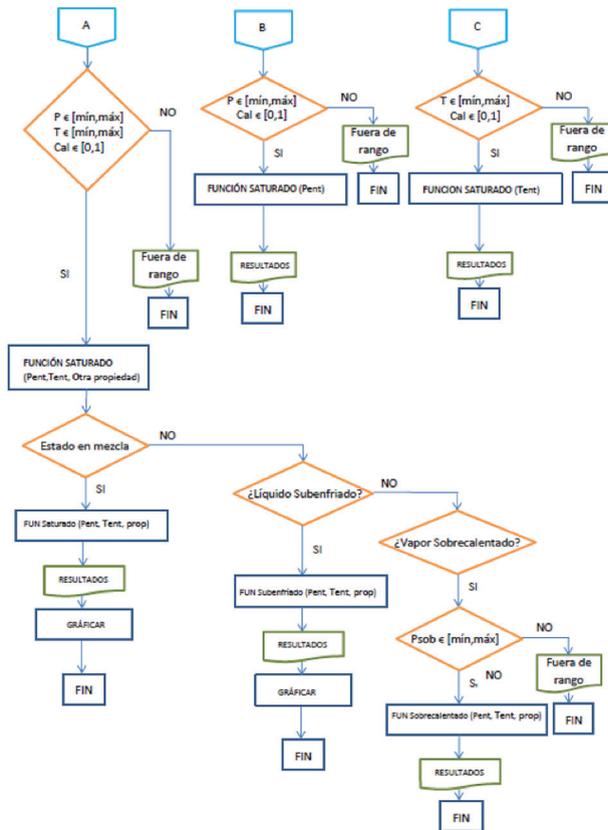


Figura 27. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo de las propiedades termodinámicas

Fuente: Elaborada por los autores.

3.1.1.2. Rangos y limitaciones de las variables de entrada

El rango de entrada para las sustancias puras va directamente relacionado con la sustancia que seleccione el usuario, por tal motivo no se colocó un rango fijo y se le avisa al usuario cuando los datos de entrada generan un resultado fuera de rango, caso que se presenta al salir del rango de las tablas de saturación o vapor sobrecalentado.

En cuanto a los gases no hay restricciones, sin embargo con la ecuación de Van der Waals hay que tener en cuenta que fue la primera en diseñarse y tuvo ciertas restricciones que entregan resultados más precisos a presiones moderadas:

- El valor de “b” no es constante y varía con la presión y temperatura.
- El valor de V_c no es igual a “3b” en todos los casos, en muchos es “2b”.
- El valor de $\frac{RT_c}{P_c V_c}$ no es igual a “8/3” para todos los gases, aunque sí para la mayoría.

3.1.1.3. Diseño y construcción de la interfaz gráfica

Visual Studio Professional permite crear interfaces muy dinámicas por medio de su gran variedad de eventos y controles para los recursos gráficos. En la ventana principal de la aplicación, como lo muestra la Figura 28 tenemos la opción “CALCULAR PROPIEDADES”, la cual llama al formulario mostrado en la Figura 29

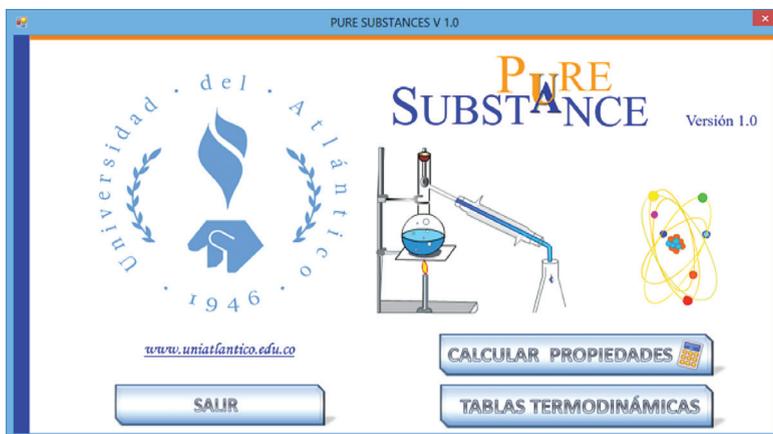


Figura 28. Ventana principal de la aplicación Pure Substances V.1.0

Fuente: Elaborada por los autores.

La ventana “CALCULAR PROPIEDADES” mostrada en la Figura 29 se divide en cuatro partes, la primera es para escoger la sustancia y sistema de

unidades a trabajar, la segunda parte es la entrada de datos suministrados por el usuario, la tercera parte es la encargada de visualizar el resultado gráficamente y la cuarta entrega el resultado tabulado en la tabla inferior.



Figura 29. Ventana principal calcular propiedades

Fuente: Elaborada por los autores.

3.1.1.4. Validación del *software* Pure Substance V 1.0

Para verificar que el software cumple con las especificaciones y que logra su cometido y satisface los requisitos iniciales al tener el final de la aplicación se seleccionaron los libros de la literatura para la comparación de los resultados y su validación (Ver Anexo C).

En la Figura 30 se muestra que las propiedades en estado saturado siempre se muestran a la presión de saturación o temperatura de saturación, con el objetivo que el usuario tenga una visión más amplia del resultado que recibe siendo este líquido subenfriado o se encuentre en vapor sobrecalentado.



Figura 30. Presentación de resultados en Pure Substance V.1.0

Fuente: Elaborada por los autores.

Cálculo de propiedades termodinámicas de los gases ideales

Los gases son calculados en base a la ecuación de Van der Waals. En la parte derecha de la figura 31 se observa la Presión crítica (P_{cr}), Temperatura crítica T_{cr} , y volumen específico molar M del Nitrógeno y en la parte izquierda se observa la constante R de los gases ideales. Cualquiera de estas tres propiedades presión, temperatura o volumen pueden ser calculada si se cuenta con dos de ellas.

• Dióxido de carbono CO_2

La figura 31 muestra el cálculo de la temperatura del dióxido de carbono a una presión de 40 kPa y a temperatura de 350 K con la ecuación de Van der Waals, el *software* entrega el valor específico molar con el valor de 2,5967 m^3/kg .



Figura 31. Cálculo de propiedades del dióxido de carbono a 40 kPa y 350 K

Fuente: Elaborada por los autores.

3.2. Contenido módulo ciclos de potencia de vapor y gas

3.2.1. Aplicación Power Cycle V.2.0. Power Cycle V.2.0

Es una aplicación creada en Matlab® para trabajar los diferentes ciclos de potencia como el ciclo Rankine simple, Rankine con recalentamiento, Brayton, el ciclo combinado, entre otros. Se muestra en la figura 32, la ventana principal de la aplicación, para ingresar a cualquier ciclo, se escoge el ciclo a estudiar y se hace clic en iniciar.



Figura 32. Ventana de inicio de la aplicación Power Cycle V.2

Fuente: Elaborada por los autores.

3.2.2. Diseño del algoritmo de la aplicación ciclo Rankine simple

El código para la aplicación Ciclo Rankine simple se basó en la lógica que se desarrolló en el algoritmo que se presenta en la figura 33; las variables de entrada son T_1 , P_1 , P_2 , n_{turb} , n_{bomba} , además se muestran los rangos de la aplicación.

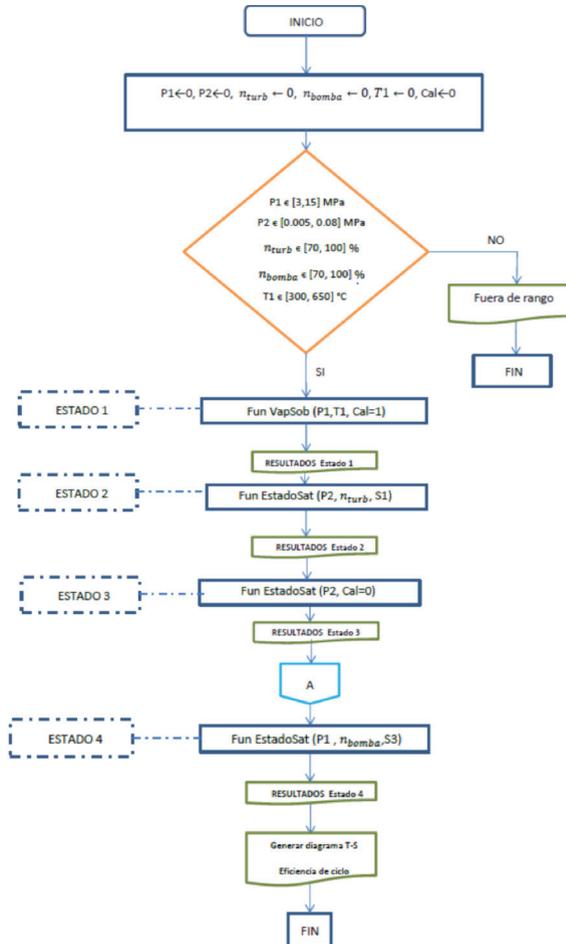


Figura 33. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación Rankine simple

Fuente: Elaborada por los autores.

•Explicación del algoritmo

Para poder calcular las propiedades en cada uno de los estados se deben cumplir las condiciones de restricción impuestas en las variables de entrada. El programa muestra mensajes de diálogo cuyas lógicas orientan las acciones correctivas que realice el usuario.

Estado 1: Con los valores de entrada para T_1, P_1 ingresados por el usuario en el software en referencia al vapor entrando a la turbina, se llama a la función VapSob y se calculan las propiedades v_1, h_1, s_1 , según los valores de T_1, P_1 .

Estado 2: Con el valor ingresado por el usuario para la presión a la salida de la turbina P_2 se halla $T_{\text{Sat}@P_2}$, llamamos a la función EstadoSat y obtenemos las propiedades $s_g, s_f, h_g, h_f, v_g, v_f$. Si $n_{\text{turb}}=1$, se hace $s_1=s_2$. Después se compara s_2 con s_g , si $s_2 \leq s_g$ se procede a calcular la calidad, y con esta se calcula las otras propiedades del estado en fase de mezcla.

Si $n_{\text{turb}} \neq 1$, se calcula h_2 de la siguiente forma: $h_2 = h_1 - \left[\left(\frac{n_{\text{turb}}}{100} \right) * (h_1 - h_{2s}) \right]$, después si $h_2 < h_g$, se procede a calcular la calidad, y con esta se busca las otras propiedades del estado; pero si $h_2 > h_g$, se entra a la función VapSob, y se calculan las otras propiedades.

Estado 3: Con la variable de entrada P_2 , se entra a la función Estadosat y se calculan las propiedades de líquido saturado.

Estado 4: Si $n_{\text{bomba}}=1$ se hace $S_3=S_4$, luego se calcula el trabajo isoentrópico de la bomba como $W=v_3*(P_4-P_3)$; con esto se calcula h_{4s} como sigue: $h_{4s}=W+h_3$.

Si $n_{\text{bomba}} \neq 1$, se calcula h_4 de la siguiente forma: $h_4 = \left[\frac{W}{n_{\text{bomba}}} * 100 \right] + h_3$; después con las variables P_4 y h_4 se entra a la función Estadosat y se calculan las propiedades de líquido saturado.

3.2.2.1. Diseño de la interfaz de la ventana de Ciclo Rankine simple

Se observa en la figura 34 la ventana de aplicación del Ciclo Rankine simple, en la parte izquierda se encuentra el panel con las variables de entrada; en la parte central hay un esquema representativo del ciclo Rankine simple, para que el usuario tenga una guía de cuáles son los estados del ciclo; en la parte derecha está el espacio donde quedan graficados los resultados en el diagrama T-s; en la parte inferior los resultados de la aplicación se muestran en un panel; por último, en la parte derecha inferior aparece el resultado de la eficiencia del ciclo y los botones de “regresar”, y esto nos devuelve la ventana principal de la aplicación Power Cycle V.2 y el botón “cerrar”.

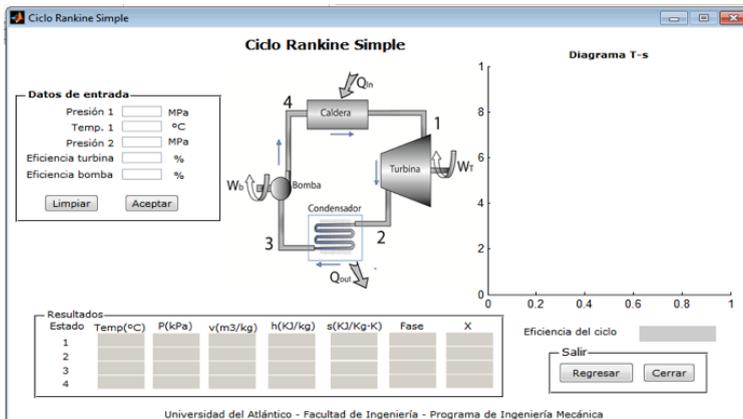


Figura 34. Ventana de la aplicación ciclo Rankine simple

Fuente: Elaborada por los autores.

3.2.2.2. Verificación de los resultados

Para la verificación del algoritmo de cálculo de la aplicación Rankine simple, se realizaron con el software Power Cycle V.2 varios ejercicios propuestos en la literatura y se compararon con los resultados proporcionados por los diferentes textos, como se muestra en la Tabla 4.

•**Ejercicio 11-26 (M):** Un sistema de generación eléctrica de 200 MW, con turbina de vapor, funciona con un ciclo Rankine ideal. El vapor entra

a la turbina a 640 °C y 14 MPa, y sale al condensador a 65 kPa. Calcule la eficiencia del ciclo⁸.

•**Ejercicio 8.2:** El fluido de trabajo en un ciclo Rankine ideal es agua. En la turbina entra vapor sobrecalentado a 8 MPa, y 480 °C. La presión del condensador es de 8 kPa. La potencia neta del ciclo es 100 MW. Determine para el ciclo el rendimiento térmico⁹.

Ejercicio	Datos reportados literatura	Power Cycle V.2.0	Error
11-26 (M)	38.36 %	38.26 %	0.26 %
8.2	39.70 %	39.74 %	0.10 %

Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Power Cycle V.2.0 y los datos reportados en la literatura de los diferentes ejercicios

Fuente: Elaborada por los autores.

Los resultados del ejercicio 11-26 (M) se observan en la figura 35, además de obtener el diagrama T-s.

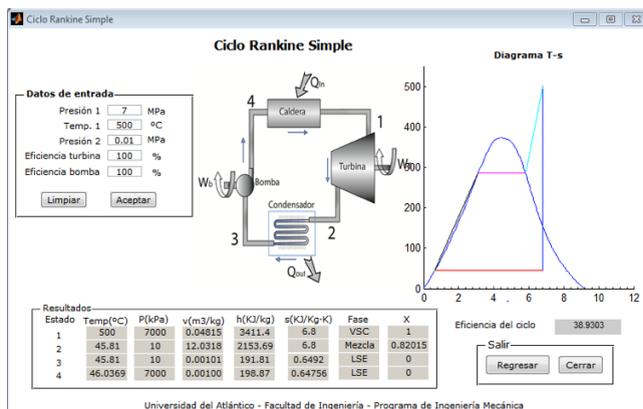


Figura 35. Resultados del ejercicio 11-26 (M)

Fuente: Elaborada por los autores.

8 K. C. Rolle, Termodinámica, 6th. ed. México: Pearson Educación, 2006, Pág. 417.

9 M. J. Moran and H. N. Shapiro, Fundamentos de termodinámica técnica, 2nd. ed. España: Editorial Reverté, 2004, Pág 419.

Para las demás aplicaciones que contiene el *software* Power Cycle V.2.0, se realizó la misma metodología, que está detallada en el anexo D.

3.3. Contenido del módulo ciclos de refrigeración

3.3.1. Aplicación RefriTerm V.2.0. Refri-term V.2.0

Es un *software* creado en Matlab® para trabajar los ciclos de refrigeración simple, refrigeración en cascada, refrigeración multietapas, refrigeración por absorción. Su principal ventaja es la de graficar y presentar las propiedades de cada estado que se analice por cada ciclo. La ventana de presentación del programa se observa en la figura 36; seleccionando la primera opción y al hacer clic en “iniciar”, muestra la siguiente la interfaz:



Figura 36. Ventana de inicio de la aplicación Refri-term V.2.0
Fuente: Elaborada por los autores.

3.3.1.1. Generalidades de la interfaz de los ciclos de refrigeración

La interfaz mostrada en la Figura 37 se compone de una zona de datos de entrada y salida, una zona de presentación de los resultados tabulados en la parte inferior, y la representación gráfica de todo el ciclo en la parte

derecha, además de los botones para calcular, borrar y volver a la ventana principal. El ciclo en general permite calcular ciclo ideal de compresión vapor y ciclo real. Los siguientes ciclos de refrigeración están estructurados con una distribución de la interfaz de forma similar agregando campos especiales de acuerdo a las características de cada uno, por ejemplo, en el ciclo de refrigeración por absorción se necesita el calor que aporta la fuente externa o comúnmente un conjunto de paneles solares.

La parte gráfica se encarga de dibujar el diagrama T-s en el domo con los datos obtenidos por el mismo software. Dándole una idea al estudiante de que valores de entrada modificar para obtener mayores resultados en el COP.

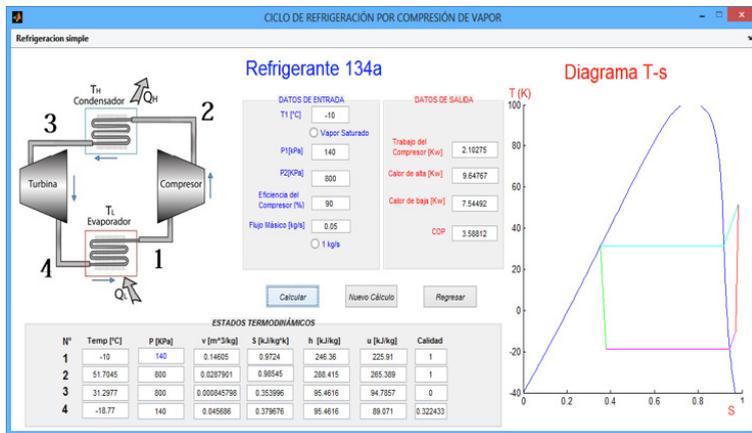


Figura 37. Cálculo del ciclo real de refrigeración en Refri-term V.2.0.

Fuente Autores.

3.3.2. Diseño del algoritmo de la aplicación ciclo de refrigeración simple

Para poder calcular las propiedades en cada uno de los estados se deben cumplir las condiciones de restricción impuestas a cada variable de entrada, sino el programa informará al usuario de los rangos o las condiciones que están siendo incumplidas por el usuario para ejecutar el código y obtener los resultados, como se muestra en la Figura 38.

- ESTADO 1:** Para el cálculo del primer estado es necesario entregar a la función EstadoSat los valores de las variables P_1 y Cal, donde Cal es igual a 1 y P_1 igual al valor ingresado por el usuario.
- ESTADO 2:** Con las variables de entrada P_2 , Cal, S_1 y n_{comp1} podemos entrar a calcular el estado en la función VapSob.
- ESTADO 3:** El estado tres se encuentra en líquido subenfriado, por lo tanto se trabaja con la P_2 y Cal con un valor igual a cero para entrar a la función EstadoSat.
- ESTADO 4:** El estado final se encuentra en mezcla que se genera al estrangular al refrigerante en el estado 3 hasta la presión de baja P_1 , por lo cual la entalpía del estado tres H_3 es la misma en que en el estado 4, por lo tanto con P_1 y H_3 entramos a la función EstadoSat.

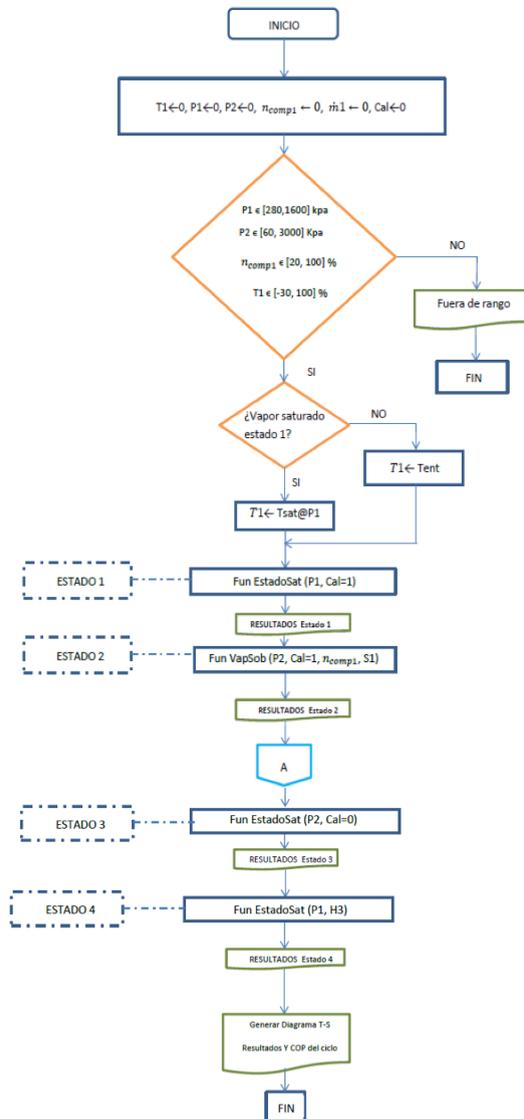


Figura 38. Diagrama de flujo del algoritmo para el ciclo de refrigeración simple.

Fuente Autores.

6.3.2.1. Verificación de los resultados

Para la verificación del algoritmo de cálculo del ciclo de refrigeración simple, se realizaron con el software Refri-term V.2.0 varios ejercicios propuestos en la literatura y se compararon con los resultados proporcionados por los diferentes textos, como lo muestra la Tabla 5.

•**Ejercicio 12-12:** Un refrigerador por compresión seca ideal funciona con el ciclo de la figura 12-5a. Si el medio de trabajo es refrigerante 134-a, y las presiones son 1190 kPa y 296 kPa, calcule a) el trabajo de compresión, b) el calor agregado, c) el calor rechazado¹⁰.

El resultado del ejercicio 12-12 se muestra en la Figura 39 con su respectiva gráfica.

Datos reportados literatura	Refri-term V.2.0	Error
161,600 kJ/kg	162,313 kJ/kg	0.44%
132,960 kJ/kg	133,314 kJ/kg	0.26%
28,64 kJ/kg	28,99 kJ/kg	0.02%

Tabla 5. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Refri-term V.2.0 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 12-12.

Fuente: Elaborada por los autores.

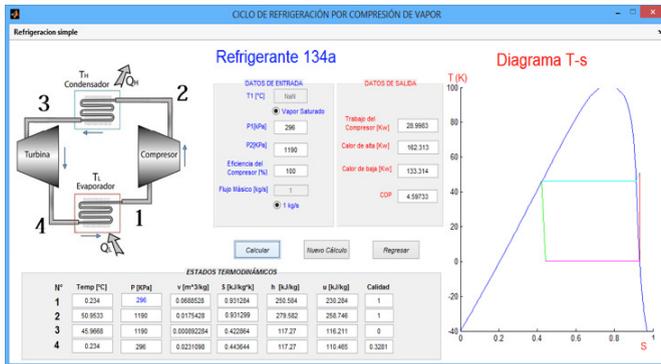


Figura 39. Resultado del ejercicio 12-12.

Fuente: Elaborada por los autores.

10 K. C. Rolle, Termodinámica, 6th. ed. México: Pearson Educación, 2006, Pág. 451.

Para las demás aplicaciones que contiene el software Refri-term V.2.0, se realizó la misma metodología, y se encuentra detallado en el anexo E.

3.4. Contenido módulo acondicionamiento de aire

3.4.1 Aplicación PSYCROFAST 2014

PSYCROFAST 2014 es un software creado en Visual Basic®, que permite analizar diferentes procesos de acondicionamiento de aire. PSYCROFAST 2014 también es capaz de representar los resultados en la carta psicrométrica. Se observa en la Figura 40 la ventana principal de la aplicación.



Figura 40. Ventana principal de PSYCROFAST 2014.

Fuente: Elaborada por los autores.

3.4.2. Diseño del algoritmo de la aplicación calentamiento simple

El código para la aplicación calentamiento Simple se basó en la lógica que se desarrolló en el algoritmo que se presenta en la Figura 41.

Solamente la aplicación podrá graficar en la carta psicrométrica valores aproximados a 1 atm, es decir, valores de presión de entrada entre 99 kPa

a 102kPa, porque, la carta psicrométrica que utiliza la aplicación es a 1 atm de presión.

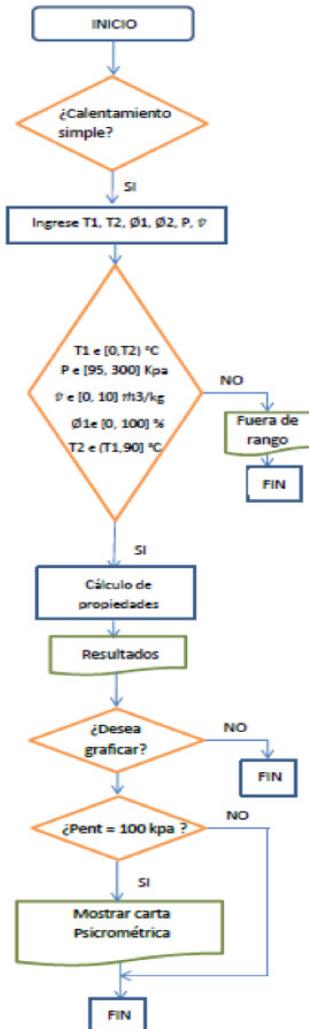


Figura 41. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación calentamiento simple.

Fuente: Elaborada por los autores.

3.4.2.1. Diseño de la interfaz de la ventana calentamiento simple

Para poder ingresar a la ventana de la aplicación calentamiento simple, en la ventana principal de la aplicación PSYCROFAST 2014 se le da click al botón de calentamiento simple.

Se observa en la Figura 42 la ventana de la aplicación de calentamiento simple, consta de una barra de menú donde se encuentra “archivo” y “ayuda”, en archivo tenemos la posibilidad de visualizar la carta psicrométrica, y en ayuda nos muestra el tutorial del software. La ventana se divide en dos estados; estado 1 que es el de entrada y el estado 2 el de salida, y entre ellos se observa un esquema representativo del proceso.

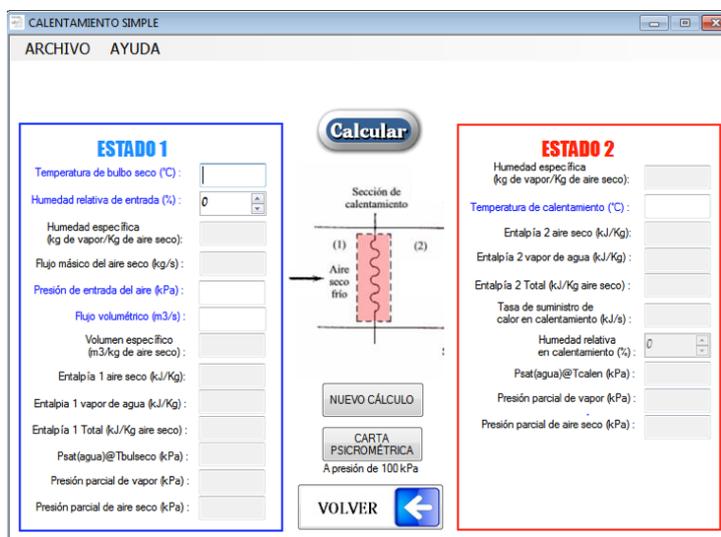


Figura 42. Ventana de la aplicación calentamiento simple.

Fuente: Elaborada por los autores.

3.4.2.2. Verificación de los resultados

Para la verificación del algoritmo de cálculo del proceso de calentamiento simple, se realizó con el software PSYCROFAST 2014 varios ejercicios propuestos en la literatura y se compararon con los resultados proporcionados por los diferentes textos, como se muestra en la Tabla 6.

•**Ejercicio 14-75:** Se calienta aire húmedo saturado a 200kPa, de 15°C a 30°C, mientras fluye por un tubo de 4cm de diámetro con una velocidad de 20m/s despreciando las pérdidas de presión, calcule la humedad relativa a la salida del tubo y la tasa de transferencia de calor de aire en KW¹¹.

Primero se halla el flujo volumétrico con el diámetro del tubo y la velocidad de entrada del aire, para poder ingresar esta variable de entrada a la aplicación:

$$\dot{V} = VA = V \frac{\pi d^2}{4} = \left(20 \frac{m}{s}\right) \left(\frac{\pi (0.04m)^2}{4}\right) = 0,02513 \text{ m}^3/s$$

El resultado del ejercicio 14-75 se muestra en la Figura 43.

Datos reportados literatura	PSYCROFAST 2014	Error
40.2%	40.0%	0.49%
0.918 KW	0.917 KW	0.11%

Tabla 6. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación PSYCROFAST 2014 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 14-75.

Fuente: Elaborada por los autores.

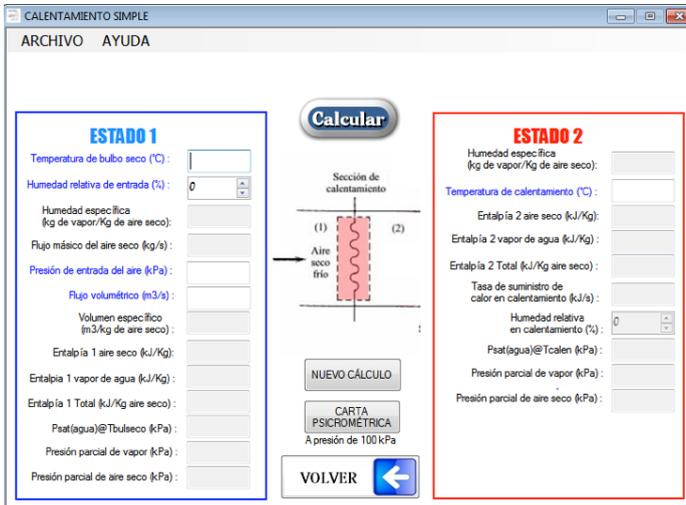


Figura 43. Resultados del ejercicio 14-75.

Fuente: Elaborada por los autores.

11 Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 6^{ta}. ed. México: McGraw-Hill, 2009., Pág 758.

Para las demás aplicaciones que contiene el software PSYCROFAST 2014, se realizó la misma metodología, y se encuentra detallado en el anexo F.

3.5. Diseño y construcción del laboratorio virtual en la plataforma SICVI-567

SICVI-567 (Sistemas de créditos complementarios virtuales) es una herramienta para crear cursos virtuales en la universidad del Atlántico, basado en la plataforma LCMS (Learning Content Management System) de código libre, Moodle, e integrado con las matriculaciones de los estudiantes y la asignación docente realizadas en Academusoft.

Este proyecto fue desarrollado por la vicerrectoría de docencia con el apoyo de la oficina de informática de la universidad del Atlántico en el año del 2010.

Se diseñó un entorno cliente-servidor para la plataforma SICVI, como se muestra en la Figura 44 teniendo en cuenta aspectos como la amigabilidad y facilidad de interacción de manera que el estudiante disfrute de un ambiente de aprendizaje apropiado y estimulante.



Figura 44. Página principal del laboratorio virtual de termodinámica en la plataforma del SICVI de la Universidad del Atlántico.

Fuente: Elaborada por los autores.

Se cargaron a la plataforma del SICVI-567 los diferentes módulos explicados anteriormente, se muestran en la Figura 45 y Figura 46, los módulos de sustancias puras y ciclo de potencias cargados en la plataforma.



Figura 45. Módulo de sustancias puras del laboratorio virtual de termodinámica en la plataforma del SICVI de la Universidad del Atlántico.

Fuente: Elaborada por los autores.



Figura 46. Módulo de ciclos de potencia del laboratorio virtual de termodinámica en la plataforma del SICVI de la Universidad del Atlántico.

Fuente: Elaborada por los autores.

Cada módulo cuenta con una introducción, un marco teórico y los procesos o ciclos del tema a tocar, además de contar con una guía teórico práctica, como

se muestra en la Figura 47, que el estudiante puede descargar para realizarla con ayuda del software, para que este complemente su aprendizaje del curso.

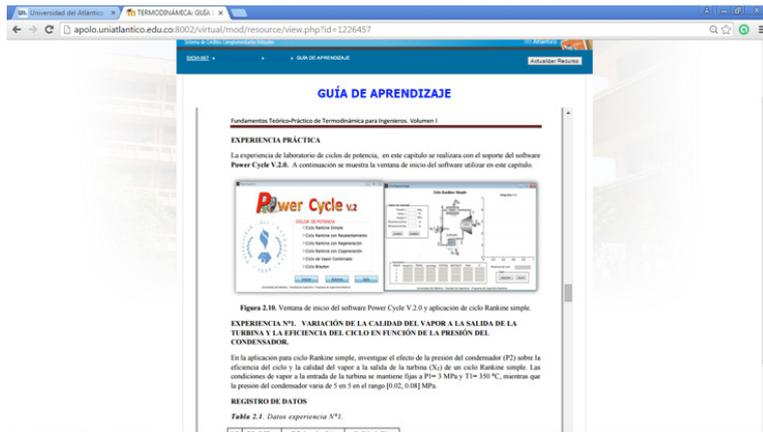


Figura 47. Ventana de la guía teórico - práctica del módulo ciclos de potencia del laboratorio virtual de termodinámica en la plataforma del SICVI de la Universidad del Atlántico.

Fuente: Elaborada por los autores.

El montaje del contenido de los módulos a la plataforma del SICVI-567 se llevó a cabo mediante el lenguaje HTML (HyperText Markup Language) que es un lenguaje de marcado para la elaboración de páginas web.

3.6. Socialización del laboratorio virtual a los estudiantes de termodinámica de la Universidad del Atlántico

Para la evaluación y retroalimentación del LV (Laboratorio Virtual) se realizaron una encuesta previa a una muestra de 47 estudiantes antes de que tuvieran conocimiento de un tema nuevo y otra encuesta después de tener un dominio básico del tema y haber realizado las prácticas en el laboratorio virtual.

La primera pregunta consistió en evaluar la mejora en el aprendizaje de conceptos que necesitan una visualización abstracta y que muchas veces el

estudiante no logra desarrollar por la complejidad de tener que relacionar varias teorías. La Figura 48 muestra el resultado de mejora en un 20% en la comprensión de los conceptos o teorías.

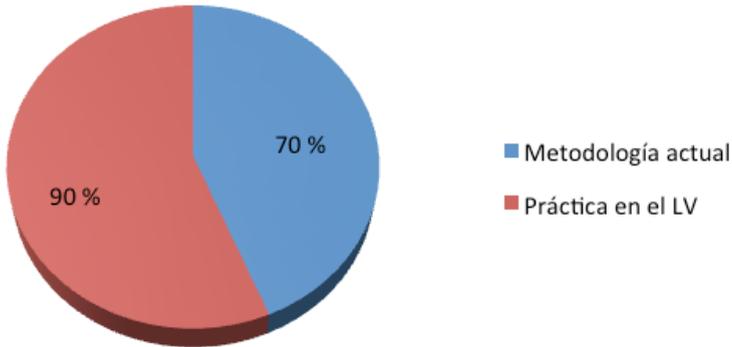


Figura 48. Porcentaje de comprensión de los conceptos.

Fuente: Elaborada por los autores.

La pregunta 2 se enfoca en la capacidad para resolver problemas. Los estudiantes informaron que al ver el comportamiento y variación de los diferentes parámetros de salida y entrada, podían resolver más rápido y de forma lógica los problemas, como lo muestra la Figura 49

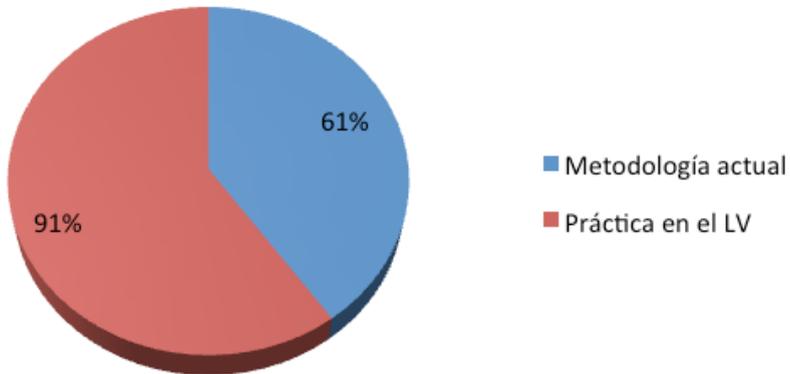


Figura 49. Porcentaje de capacidad para resolver problemas.

Fuente: Elaborada por los autores.

La pregunta 3 confirma si el contenido del laboratorio es suficiente para dar un soporte completo durante toda la asignatura de inicio a fin. La aceptación por parte de los estudiantes es buena, consideran el laboratorio muy completo para ser utilizado como material complementario, como lo muestra la Figura 50.

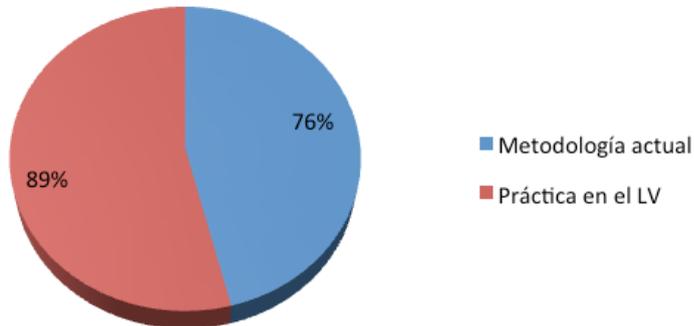


Figura 50. Material utilizado como complementario en la asignatura.

Fuente: Elaborada por los autores.

La pregunta 4, se enfoca en la evaluación de la flexibilidad de los parámetros para controlar los procesos. Se estima un ahorro del 29% en el tiempo para que el estudiante estudie el papel de cada variable en las ecuaciones que rigen los procesos, como lo muestra la Figura 51.

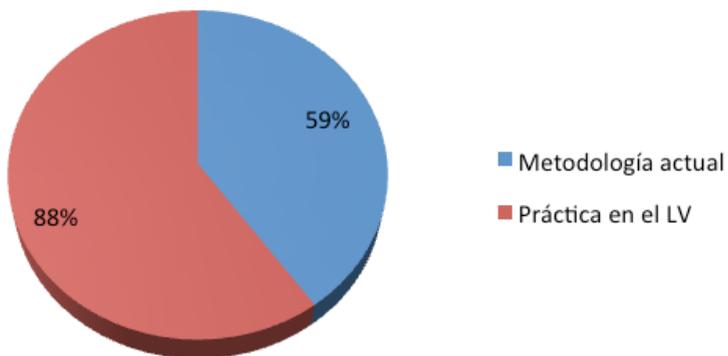


Figura 51. Flexibilidad en los parámetros del proceso.

Fuente: Elaborada por los autores.

La pregunta 5 evalúa que tan interactiva e intuitiva son las interfaces de los softwares que conforman el LV en comparación con software de alta gama que se encuentran en el mercado, como lo muestra la Figura 52. Hysis® es un poderoso simulador de innumerables procesos, pero su alto costo hace difícil poder acceder a estas licencias, además que tomaría tiempo extra o hasta otro curso enseñar a diseñar los procesos y configurar los dispositivos a simular que el estudiante no podría aprovechar para enfocarse en el aprendizaje de los conceptos básicos, es recomendable que los estudiantes interesados en el área térmica posteriormente que hayan pasado los cursos de termodinámica entonces si se dediquen a aprender un software de esta magnitud.

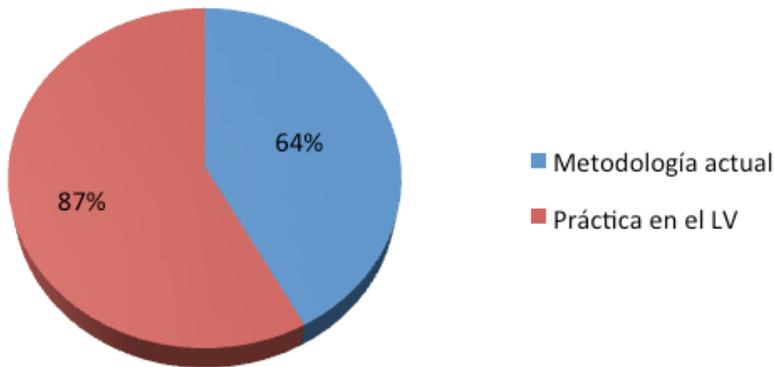


Figura 52. Qué tan intuitivas son las interfaces del LV vs programas licenciados en el mercado.

Fuente: Elaborada por los autores.

La pregunta 6 evalúa el porcentaje de aceptación en general por los estudiantes del LV y la expectativa que tenían de este como herramienta. Se observa una diferencia del 3% entre la expectativa y lo real para los estudiantes, además en un porcentaje del 90% que valida a la estructura y contenido del LV como acertado, como lo muestra la Figura 53.

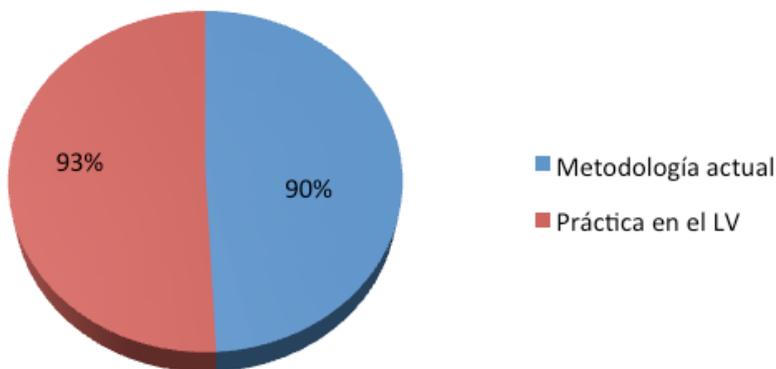


Figura 53. Comparación entre aceptación real y expectativa del LV.

Fuente: Elaborada por los autores.

Ahora se calcula el coeficiente alfa de Cronbach para los instrumentos (encuestas):

$$\alpha_{Antes} = 0.687$$

$$\alpha_{Despues} = 0.719$$

El coeficiente alfa de Cronbach para la encuesta después de usar el programa fue de 0.719 es mayor que el mínimo aceptable de 0.7, por lo tanto existe una fuerte relación entre las preguntas de la encuesta; pero el coeficiente de alfa de Cronbach para la encuesta antes de usar el programa fue 0.687 ligeramente inferior al mínimo 0.7, por lo cual existe una relación levemente menos confiable pero aceptable.

CONCLUSIONES

Se elaboraron cuatro módulos para el laboratorio virtual de la asignatura de termodinámica, y cada uno cuenta con una guía teórico – práctica, un software y el tutorial de la aplicación. El porcentaje de error de cada software, se tomó de las tablas de verificación de resultados y son los siguientes:

- Los resultados conseguidos con el software Pure Substance V.1.0 para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua registra un rango

de error promedio de $[0, 0.24]$ %. Para el cálculo de las propiedades termodinámicas del amoníaco el error se encuentra en el rango de $[0, 3.9]$ % y para el cálculo de las propiedades del refrigerante 134a el error promedio es de 0%. Los resultados varían, porque, se hicieron las validaciones con diferentes libros y cada libro tiene diferentes valores de las propiedades en sus tablas termodinámicas. Para calcular las propiedades termodinámicas de los gases ideales se utilizó la ecuación de Van der Waals dando resultados con bajo porcentaje de error en el rango de presión de $[100, 5000]$ kPa.

- Con el software Power Cycle V.2.0 se calcularon la eficiencia de cada ciclo consiguiendo el siguiente rango de error en todas sus aplicaciones: $[0, 1.3]$ %, igual que el software Pure Substance V.1.0, los resultados varían, porque, se utilizaron diferentes textos para validar el software y cada texto tiene diferentes valores de las propiedades en sus tablas termodinámicas.
- Con el software Refri-term V.2.0 se calculó el calor retirado, el calor entregado al ambiente, el trabajo realizado por los compresores, el flujo másico del algunos ciclos y el COP obteniendo un rango de error de $[0, 0.44]$ % en todas las aplicaciones que cuenta el programa.
- Con el software PSYCROFAST 2014 se consiguió simular los diferentes procesos de acondicionamiento de aire, permitiendo observar el cambio de cada uno de sus parámetros y como estos influían en la humedad relativa y temperatura de salida, además de mostrar los resultados graficados en la carta psicrométrica, obteniendo un rango de error de $[0, 0.74]$ % en los diferentes procesos que abarca esta aplicación.

Se diseñó un entorno cliente-servidor para la plataforma SICVI- 567 teniendo en cuenta aspectos como la amigabilidad y facilidad de interacción de manera que el estudiante tenga un buen ambiente de aprendizaje, además de crear el tercer curso virtual en la plataforma SICVI-567, así como de las dos de las asignaturas existentes que son catedra universitaria y cultura ciudadana.

Se evidenció una gran aceptación por parte de los estudiantes hacia el laboratorio virtual como una herramienta complementaria. Los LV son herramientas que prometen un gran aporte en el desarrollo de las asignaturas y en el aprendizaje significativo de los estudiantes, además de un ahorro de dinero para las instituciones que no cuentan con las instalaciones ni el con el presupuesto para adecuar y mantener equipos costosos.

Es necesaria la inclusión paulatina de esta herramienta virtual en el contenido programático de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química y sea tomado como parte de la asignatura de termodinámica.

Hubo un aumento en la capacidad de resolver problemas y mejor comprensión de los conceptos en la muestra de los estudiantes que realizaron y compartieron la guía práctica del laboratorio.

Es importante seguir unas directrices para el desarrollo de los LV y evitar crear un material que no sea productivo o amigable con el estudiante.

RECOMENDACIONES

Considerando los aportes realizados a través del laboratorio virtual de termodinámica, los autores recomiendan a la comunidad académica seguir desarrollando módulos que permitan apoyar los procesos de enseñanza aprendizaje con entornos virtuales, además de integrar temáticas de otras asignaturas como transferencia de calor y operaciones unitarias.

De igual manera se recomienda a los docentes e investigadores crear más cursos virtuales en la plataforma SICVI-567, ya que en distintas instituciones de educación superior se espera que a través de la plataforma se oferte programas virtuales de pregrado y postgrado.

AGRADECIMIENTOS

“Queremos dar las gracias a todos aquellos que nos han apoyado en este ejercicio de investigación, empezando por nuestras familias y amigos los cuales han tenido mucha calma y paciencia en muchas reuniones al escucharnos hablar del libro continuamente. En segunda instancia, queremos agradecerles a todos los estudiantes de ingeniería que se encuentran inscritos en el curso virtual en la plataforma y que durante estos dos últimos años nos han compartido sus comentarios o preguntas respecto a cada una de las experiencias en los distintos ejes temáticos que contiene este libro. De igual manera, se agradece a todos aquellos estudiantes de ingeniería que a diario comparten sus conocimientos en termodinámica a través de los distintos medios de la plataforma SICVI, de los que hemos adquirido importantes conocimientos sobre ciclos termodinámicos. Por supuesto, no queremos olvidar a todos nuestros alumnos de pregrado en ingeniería mecánica y química que han compartido con nosotros estas herramientas desde el 2014, y de los que también nos hemos enriquecido y aprendido mucho. Por último, queremos expresar un agradecimiento especial a las distintas unidades académicas de la Universidad del Atlántico que nos han permitido los recursos físicos y financieros para el desarrollo de esta investigación. Gracias a todos de corazón.”

Los autores

BIBLIOGRAFÍA

F. Becerra, “Aprendizaje En Colaboración Mediado Por Simulación En Computador. Efectos En El Aprendizaje De Procesos Termodinámicos,” *Revista De Estudios Sociales*, No. 20, pp. 13-26, Jun. 2005.

N. Mulop, K. Mohd y Z. Tasir, “A review on enhancing the teaching and learning of thermodynamic”, *presented at 3rd Regional Conference on Engineering Education and Research in Higher Education*, Kuching, Malaysia, 2010.

M. César, J. Ruiz, M. Bracho y C. Villamar, “ A program to simulate steam power plant thermodynamic cycles”, *Revista Ciencia e Ingeniería*, vol. 28, No. 3, pp. 175-182, 2007.

Universidad Nacional de Colombia. Termodinámica [en línea]. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingeniería/2001762/index.html>. [Consultada: 10-09-14]

Universidad del Valle. SISMILAB [en línea]. <<http://sismilab.univalle.edu.co/>>. [Consultada: 09-03-2015].

M. Alvarez, J. Xiques, “Desarrollo de un software para el diseño, modelamiento y evaluación de tiro inducido a contracorriente”, Proyecto fin de carrera, Facultad de ingeniería, Universidad del Atlántico, Atlántico, Colombia, 2008.

J. Cárcamo, D. Armando, C. Lora, “Desarrollo de un software para predecir propiedades termodinámicas de sustancias puras y analizar ciclos de potencia de vapor”, Proyecto fin de carrera, Facultad de ingeniería, Universidad del Atlántico, Atlántico, Colombia, 2009.

A. Herrera, L. Maldonado, “Diseño y construcción de una enciclopedia virtual para estudiantes de ingeniería mecánica de la universidad del Atlántico”, Proyecto fin de carrera, Facultad de ingeniería, Universidad del Atlántico, Atlántico, Colombia, 2011.

S. Guerra, R. Vázquez y M. Rodríguez, “Simulación de Plantas de Cogeneración de Ciclo Combinado usando ASPEN®”, vol. 16, No.1, pp 42-49, 2005.

L. Toselli, M. Guerreo, V. Monesterolo y R. Beltrán, “Aplicación del Simulador ChemCAD™ en la Enseñanza en Carreras de Ingeniería”, vol. 2, No.3, pp 19-24, 2009.

K. Forbus, P. Whalley, J. Everett, L. Ureel, M. Brokowski, J. Baher, S. Kuehne, “CyclePad: An articulate virtual laboratory for engineering thermodynamics”, *Artificial Intelligence*, 114 (1999) 297-347.

E. Lemmon, M. Huber y M. McLinden, “Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1”, NIST Standard Reference Database 23, May 07, 2013.

WASP (Water and Steam Properties), Katmar Software [Online]. Available: <<http://www.katmarsoftware.com/wasp.htm>>.

K. C. Rolle, Termodinámica, 6th. ed. México: Pearson Educación, 2006.
M. J. Moran and H. N. Shapiro, Fundamentos de termodinámica técnica, 2nd. ed. España: Editorial Reverté, 2004.

ASHRAE Handbook Series.2009 Fundamentals. SI Edition Cap.1 p.1

Objetos en Visual Basic [en línea].
<[https://msdn.microsoft.com/es-es/library/tyd4tfw8\(v=vs.90\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/library/tyd4tfw8(v=vs.90).aspx)>.
[Consultada: 20 de agosto de 2015]

Objetos de Visual Basic y otros orígenes [en línea].
<[https://msdn.microsoft.com/es-es/library/0s5xx10c\(v=vs.90\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/library/0s5xx10c(v=vs.90).aspx)>.
[Consultada: 20 de agosto de 2015]

Alpha de Cronbach [en línea]. <<http://es.slideshare.net/cmashuh/alpha-de-cronbach>>. [Consultada: 15 de agosto de 2015]

S. Ávila, J. Solís y F. García “Programa de cómputo para el cálculo de propiedades fisicoquímicas y termodinámicas en ingeniería química”, Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 20, No. 1, pp. 11-17, 2005.

Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 7th. ed. México: McGraw-Hill, 2012.

K. Wark and D. E. Richards, Termodinámica, 6th. ed. España: McGraw-Hill Interamericana, 2001.

J. Bojórquez, L. López, M. Hernández y E. Jiménez, “Utilización del alfa de Cronbach para validar la confiabilidad de un instrumento de medición de satisfacción del estudiante en el uso del software Minitab”, *presented at 11th LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, Cancún, México, 2013.

ANEXOS

Anexo A. Encuesta para los estudiantes en la fase pre-instruccional y la fase post-instruccional

ENCUESTA PARA ESTUDIANTES ANTES DE USAR EL PROGRAMA					
NOMBRE ESTUDIANTE:					
CURSO:					
FECHA:					
Encuesta sobre la percepción del estudiante, la metodología y las ayudas didácticas en el curso. La encuesta tiene un rango de 1 a 5. Donde: 1. Muy bajo, Nada fácil, Nada clara, etc. 5. Excelente, Extremadamente fácil, perfectamente clara, etc.					
PREGUNTAS	1	2	3	4	5
1. ¿Qué tan fácil es visualizar e interpretar los conceptos teóricos de la asignatura con la metodología actual?					
2. ¿Evalué su capacidad para resolver los problemas relacionados con la asignatura?					
3. ¿Qué tan suficiente es el material empleado en la asignatura (bibliografía, herramientas computacionales, internet, etc.) para la comprensión de los conceptos?					
4. ¿Qué tan fácil es evaluar, con la formulación matemática vista en la asignatura, las diferentes respuestas debido a cambios en los parámetros de entrada?					
5. ¿Qué tan manejable, intuitiva e interactivas son las herramienta computacionales relacionadas con el tema para facilitar la comprensión de los conceptos?					
6. ¿Qué tan útil considera que podría ser una nueva herramienta computacional para comprender los conceptos de la asignatura?					

Figura 1. Encuesta para estudiantes antes de usar el programa.

Fuente: Elaborada por los autores.

ENCUESTA PARA ESTUDIANTES DESPUES DE USAR EL PROGRAMA					
NOMBRE ESTUDIANTE:					
CURSO:					
FECHA:					
Encuesta sobre la percepción del estudiante después de conocer la herramienta computacional como ayuda metodológica del curso. La encuesta tiene un rango de 1 a 5. Donde: 1. Muy bajo, Nada fácil, Nada clara, etc. 5. Excelente, Extremadamente fácil, perfectamente clara, etc.					
PREGUNTAS	1	2	3	4	5
1. ¿Con la herramienta computacional, qué tan fácil es visualizar e interpretar los conceptos teóricos de la asignatura?					
2. ¿Con la herramienta computacional, evalué su capacidad para resolver problemas relacionados con la asignatura?					
3. ¿Qué tan suficiente es la herramienta computacional como complemento al material disponible en el curso?					
4. ¿Con la herramienta computacional, qué tan fácil es evaluar las diferentes respuestas debido a cambios en los parámetros de entrada?					
5. ¿Qué tan manejable, intuitiva e interactiva es la herramienta computacional comparada con las que usted conocía?					
6. ¿Qué tan útil fue la herramienta computacional para comprender los conceptos de la asignatura?					

Figura 2. Encuesta para estudiantes después de usar el programa.

Fuente: Elaborada por los autores.

Anexo B. Tablas para alimentar el software Pure Substance V.1.0

Sustancia	Fórmula	Masa molar, M (lbm/lbmol)	Constante de gas, R (psia · ft ³ /lbm · R)	Propiedades del punto crítico		
				T (R)	P (psia)	V (ft ³ /lbmol)
Agua	H ₂ O	18,015	0,5956	1164,8	3200	0,9
Aire	—	28,97	0,3704	238,5	547	1,41
Alcohol-etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,2329	929	926	2,68
Alcohol-metilico	CH ₃ OH	32,042	0,3349	923,7	1154	1,89
Amoniaco	NH ₃	17,03	0,6301	729,8	1636	1,16
Argón	Ar	39,948	0,2686	272	705	1,2
Benceno	C ₆ H ₆	78,115	0,1374	1012	714	4,17
Bromo	Br ₂	159,808	0,06714	1052	1500	2,17
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1846	765,2	551	4,08
Cloro	Cl ₂	70,906	0,1517	751	1120	1,99
Cloruro-metilico	CH ₃ Cl	50,488	0,2125	749,3	968	2,29
Diclorodifluorometano	CCl ₂ F ₂	120,91	0,08874	692,4	582	3,49
Diclorofluorometano	CHCl ₂ F	102,92	0,1043	813	749	3,16
Dióxido-de-carbono	CO ₂	44,01	0,2438	547,5	1071	1,51
Etano	C ₂ H ₆	30,02	0,3574	549,8	708	2,37
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,3825	508,3	742	1,99
Helio	He	4,003	2,6809	9,5	33,2	0,926
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	86,178	0,1245	914,2	439	5,89
Hidrógeno (normal)	H ₂	2,016	5,3224	59,9	188,1	1,04
Metano	CH ₄	16,043	0,6688	343,9	673	1,59
Monóxido-de-carbono	CO	28,011	0,3831	240	507	1,49
Neón	Ne	20,183	0,5316	80,1	395	0,668
Nitrógeno	N ₂	28,013	0,383	227,1	492	1,44
Oxígeno	O ₂	31,999	0,3353	278,6	736	1,25
Propano	C ₃ H ₈	44,097	0,2433	665,9	617	3,2
Propileno	C ₃ H ₆	42,081	0,255	656,9	670	2,9
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	153,82	0,06976	1001,5	661	4,42
Tetrafluoroetano	CF ₃ CH ₂ F	102,03	0,1052	673,6	588,7	3,19
Triclorofluorometano	CCl ₃ F	137,37	0,07811	848,1	635	3,97
Xenón	Xe	131,3	0,08172	521,55	852	1,9

Tabla 1. Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico en unidades del sistema inglés.

Fuente: Adaptada de Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 7th. ed. México: McGraw-Hill, 2012. Tabla A-1E, Pág. 958.

Sustancia	Fórmula	Masa molar, M (kg/kmol)	Constante de gas, R (kJ / kg · R)	Propiedades del punto crítico		
				T (K)	P (Mpa)	V (m ³ /Kmol)
Agua	H ₂ O	18,015	0,4615	647,1	22,06	0,056
Aire	—	28,97	0,287	132,5	3,77	0,0883
Alcohol-etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,1805	516	6,38	0,1673
Alcohol-metilico	CH ₃ OH	32,042	0,2595	513,2	7,95	0,118
Amoniaco	NH ₃	17,03	0,4882	405,5	11,28	0,0724
Argón	Ar	39,948	0,2081	151	4,86	0,0749
Benceno	C ₆ H ₆	78,115	0,1064	562	4,92	0,2603
Bromo	Br ₂	159,808	0,052	584	10,34	0,1355
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,143	425,2	3,8	0,2547
Cloro	Cl ₂	70,906	0,1173	417	7,71	0,1242
Cloroformo	CHCl ₃	119,38	0,06964	536,6	5,47	0,2403
Cloruro-metilico	CH ₃ Cl	50,488	0,1647	416,3	6,68	0,143
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120,91	0,06876	384,7	4,01	0,2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102,92	0,08078	451,7	5,17	0,1973
Dióxido-de-carbono	CO ₂	44,01	0,1889	304,2	7,39	0,0943
Etano	C ₂ H ₆	30,07	0,2765	305,5	4,48	0,148
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964	282,4	5,12	0,1242
Helio	He	4,003	2,0769	5,3	0,23	0,0578
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	86,179	0,09647	507,9	3,03	0,3677
Hidrógeno(normal)	H ₂	2,016	4,124	33,3	1,3	0,0649
Metano	CH ₄	16,043	0,5182	191,1	4,64	0,0993
Monóxido-de-carbono	CO	28,011	0,2968	133	3,5	0,093
Neón	Ne	20,183	0,4119	44,5	2,73	0,0417
Nitrógeno	N ₂	28,013	0,2968	126,2	3,39	0,0899
Óxido-nitroso	N ₂ O	44,013	0,1889	309,7	7,27	0,0961
Oxígeno	O ₂	31,999	0,2598	154,8	5,08	0,078
Propano	C ₃ H ₈	44,097	0,1885	370	4,26	0,1998
Propileno	C ₃ H ₆	42,081	0,1976	365	4,62	0,181
Tetracloruro-de-carbono	CCl ₄	153,82	0,05405	556,4	4,56	0,2759
Tetrafluoroetano(R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102,03	0,08149	374,2	4,059	0,1993
Triclorofluorometano(R-11)	CCl ₃ F	137,37	0,06052	471,2	4,38	0,2478
Xenón	Xe	131,3	0,06332	289,8	5,88	0,1186

Tabla 2. Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico en unidades del sistema internacional.

Fuente: Adaptada de Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 7th. ed. México: McGraw-Hill,

2012. Tabla A-1, Pág. 908.

Se presentan a continuación la lista de tablas de saturación por temperatura y presión junto con las tablas de vapor sobrecalentado:

SUSTANCIA	UNIDAD	ESTADO
AGUA SATURADA - TEMPERATURA	INTERNACIONAL	SATURADO
AGUA SATURADA - PRESIÓN	INTERNACIONAL	SATURADO
AGUA – PRESIÓN	INTERNACIONAL	VAPOR SOBRECALENTADO
REFRIGERANTE 134A - TEMPERATURA	INTERNACIONAL	SATURADO
REFRIGERANTE 134A - PRESIÓN	INTERNACIONAL	SATURADO
REFRIGERANTE 134A - PRESIÓN	INTERNACIONAL	VAPOR SOBRECALENTADO
AMONIACO – TEMPERATURA	INTERNACIONAL	SATURADO
AMONIACO – TEMPERATURA	INTERNACIONAL	VAPOR SOBRECALENTADO
AGUA SATURADA - TEMPERATURA	INGLÉS	SATURADO
AGUA SATURADA - PRESIÓN	INGLÉS	SATURADO
AGUA – PRESIÓN	INGLÉS	VAPOR SOBRECALENTADO
REFRIGERANTE 134A - TEMPERATURA	INGLÉS	SATURADO
REFRIGERANTE 134A - PRESIÓN	INGLÉS	SATURADO
REFRIGERANTE 134A - PRESIÓN	INGLÉS	VAPOR SOBRECALENTADO

Tabla 3. Lista de tablas de propiedades termodinámicas en los diferentes sistemas.

Fuente: Elaborada por los autores.

Como se observa en las anteriores tablas¹² suministran los parámetros para el cálculo de las propiedades de los gases M , R , T_{cr} , P_{cr} y V utilizados en la ecuación de Van der Waals y las tablas de propiedades termodinámicas permiten que el algoritmo del programa entregue el resultado.

12 ÇENGEL, Yunus y Boles, Michael, Termodinámica 7^{ma} ed. México: McGraw-Hill, 2012. P. 908 y 958.

Anexo C. Validación del software PURE SUBSTANCE V 1.0.**• Agua H₂O**

P (kpa)	T (°C)	v	v (Pro- grama)	h	h (Programa)	s	S (Programa)	Promedio %Error
400	640	1,052	1,051956	3792	3793,02	8,553	8,55528	0,016
500	560	0,767	0,766834	3614	3615,3	8,249	8,24836	0,002
1000	480	0,345	0,34461	3435	3436,18	7,703	7,70476	0,018
2000	640	0,209	0,209076	3780	3781,7	7,802	7,80294	0,031
3000	800	0,164	0,1642	4145	4146,9	7,984	7,9885	0,074

Tabla 4. Cálculo de propiedades del agua a presión y temperatura dada para vapor sobrecalentado.

*Valores tomados del texto Termodinámica de Kurt C. Rolle. Sexta edición. Fuente original: Datos tomados de *ASME steam tables*, copyright 1967, y reproducidos con autorización de American Society of Mechanical Engineers.

P (kpa)	T (°C)	v	v (Pro- grama)	h	h (Programa)	s	S (Programa)	Promedio %Error
2320	220	0,00119	0,00119	944	943,590	2,518	2,5176	0,02
4690	260	0,00128	0,001275	1135	1134,646	2,885	2,885	0,14
6420	280	0,00133	0,00133	1237	1236,880	3,068	3,0684	0
8590	300	0,0014	0,0014	1345	1344,895	3,255	3,254	0,01
9870	310	0,00145	0,00144	1402	1401,779	3,351	3,3502	0,24

Tabla 5. Cálculo de propiedades del agua a presión y temperatura dada para líquido subenfriado.

*Valores tomados del texto Termodinámica de Kurt C. Rolle. Sexta edición. Fuente original: Datos tomados de *ASME steam tables*, copyright 1967, y reproducidos con autorización de American Society of Mechanical Engineers.

• Amoniaco

T (°C)	P (kpa)	v	v (Pro-grama)	h	h (Pro-grama)	s	S (Pro-grama)	Pro-medio %Error
-15	236	0,509	0,5088	1426	1424,33	5,548	5,53875	0,11
40	400	0,37	0,36884	1545,9	1543,38	5,179	5,1701	2,94
60	500	0,293	0,3141	1540,7	1585,81	5,598	5,7362	3,99
100	800	0,216	0,21949	1672,6	1670,37	5,765	5,7545	0,42
120	1000	0,185	0,18478	1715,7	1713,13	5,769	5,7612	0,13

Tabla 6. Cálculo de propiedades del amoniaco.

*Valores tomados del texto Termodinámica de Kurt C. Rolle. Sexta edición. Fuente original: Datos tomados de *ASME steam tables*, copyright 1967, y reproducidos con autorización de American Society of Mechanical Engineers.

• Refrigerante 134a

T (°C)	P (kpa)	v	v (Pro-grama)	h	h (Pro-grama)	s	S (Pro-grama)	%Error
-33,87	70	0,269	0,269	229,73	229,73	0,9604	0,9604	0
-10,09	200	0,0998	0,0998	244,46	244,46	0,9377	0,9377	0
12,46	450	0,0456	0,0456	257,53	257,53	0,9253	0,9253	0
52,40	1400	0,0141	0,0141	276,12	276,12	0,9105	0,9105	0
57,88	1600	0,0121	0,0121	277,86	277,86	0,9078	0,9078	0

Tabla 7. Cálculo de propiedades del refrigerante 134a como vapor saturado en el sistema internacional.

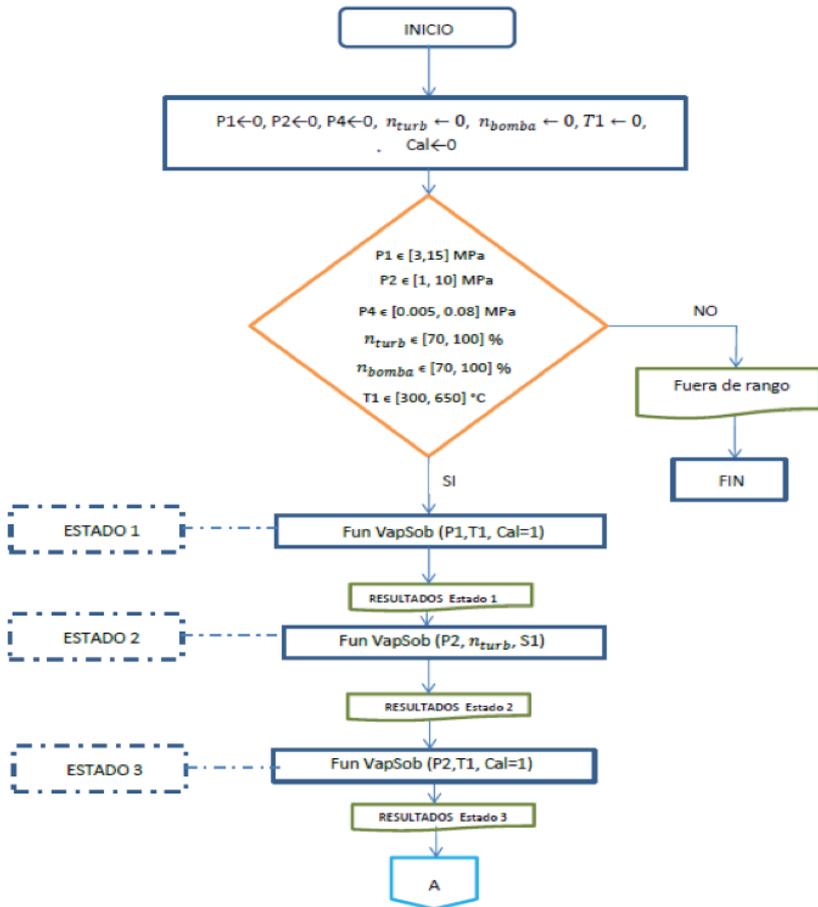
*Valores tomados del texto Termodinámica de Yunes Cengel y Michael Boles. Séptima edición.

Fuente original: Las tablas A-11 a A-13 se generaron utilizando el programa para resolver ecuaciones de ingeniería (EES) desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. La rutina utilizada en los cálculos es la R134a, la cual está basada en la ecuación fundamental de estado desarrollada por R. Tillner-Roth y H. D. Baehr, “An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for temperatures from 170 K to 455 K and pressures up to 70 MPa”, *J. Phys. Chem, Ref. Data*, vol. 23, núm. 5, 1994. Los valores de entalpía y entropía para el líquido saturado son cero a -40°C (y -40°F).

Anexo D. Aplicaciones del software Power Cycle V.2.0

D.1. Diseño del algoritmo de la aplicación ciclo Rankine con recalentamiento

La explicación del algoritmo de la aplicación del Ciclo Rankine con recalentamiento se muestra de forma resumida en la Figura 3, además de mostrar los rangos de los diferentes parámetros de entrada.



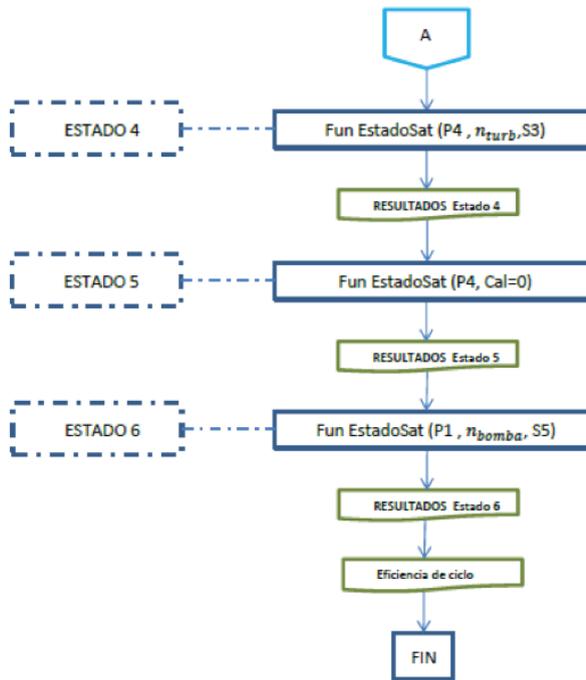


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación Rankine con recalentamiento.

Fuente: Elaborada por los autores.

•Explicación del algoritmo

Se aplica el algoritmo utilizado en la aplicación de ciclo Rankine Simple en los estados 1, 4, 5 y 6; para los estados 2 y 3 (véase Figura 33) se describe el funcionamiento del algoritmo.

Estado 2: Se hace $s_1 = s_{2S}$ y con la variable de entrada P_2 se entra a la función Estadosat y se determina el valor de h_{2S} y con este valor se calcula $h_2 = h_1 - [(n_{turb}/100 * (h_1 - h_{2S})]$, se entra a la función Estadosat con las variables de h_2 y P_2 , y se calcula la calidad. Si calidad < 1 , con la función Estadosat trae las demás propiedades, pero si calidad ≥ 1 , va entrar a la

función $VapSob$ con las variables de h_2 y P_2 y después se calculan las demás propiedades.

Estado 3: Se considera que $T_1 = T_3$ y $P_2 = P_3$, las variables T_1 y P_2 son variables de entradas, se dirige a la función $Vapsob$ con las variables T_1 y P_2 y se calculan las demás propiedades.

D.1.1. Diseño de la interfaz de la ventana de Ciclo Rankine con Recalentamiento

Se muestra en la Figura 4 la ventana de aplicación del Ciclo Rankine con recalentamiento, en la parte izquierda se encuentra el panel con las variables de entrada; en la parte derecha hay un esquema representativo del ciclo Rankine con recalentamiento; en la parte inferior se muestra el panel con los resultados de la aplicación; por último se encuentra en la parte derecha inferior el resultado de la eficiencia del ciclo y los botones de Regresar y cerrar.

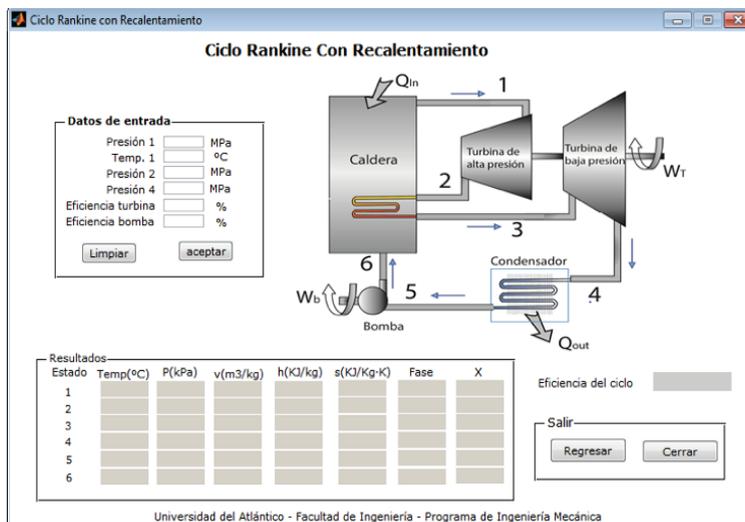


Figura 4. Ventana de la aplicación ciclo Rankine con Recalentamiento.

Fuente: Elaborada por los autores.

D.1.2. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 9-29:** Considere una planta de potencia de vapor que opera con un ciclo Rankine con recalentamiento y que tiene una salida neta de potencia de 80 MW. El vapor entra a la turbina de alta presión a 10 MPa y 500°C y a la turbina de baja presión a 1 MPa y 500°C. El vapor sale del condensador a una presión de 10 kPa. La eficiencia isoentrópica de la turbina es de 80% y la de la bomba de 95%. Determine a) la calidad (o temperatura, si hay sobrecalentamiento) del vapor a la salida de la turbina b) la eficiencia térmica del ciclo¹³.

En la Tabla 8 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con Power Cycle V.2.0 y los resultados proporcionados en el texto.

Parámetros	Datos reportados literatura	Power Cycle V.2.0	Error
T4	87.50°C	88.12°C	0.70%
eciclo	34.1%	34.04%	0.17%

Tabla 8. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Power Cycle V.2.0 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 9-29.

Fuente: Elaborada por los autores.

En la Figura 5 se muestra los resultados obtenidos con el programa del ejercicio 9-29.

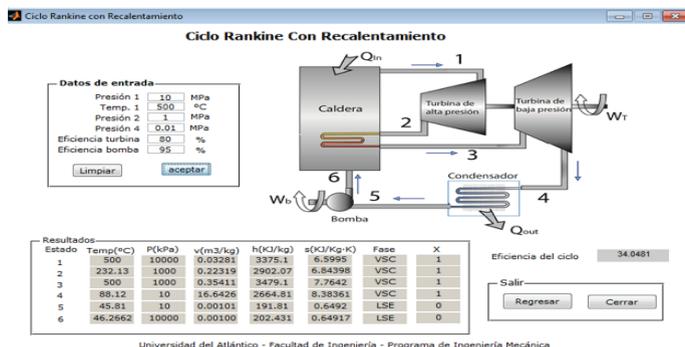


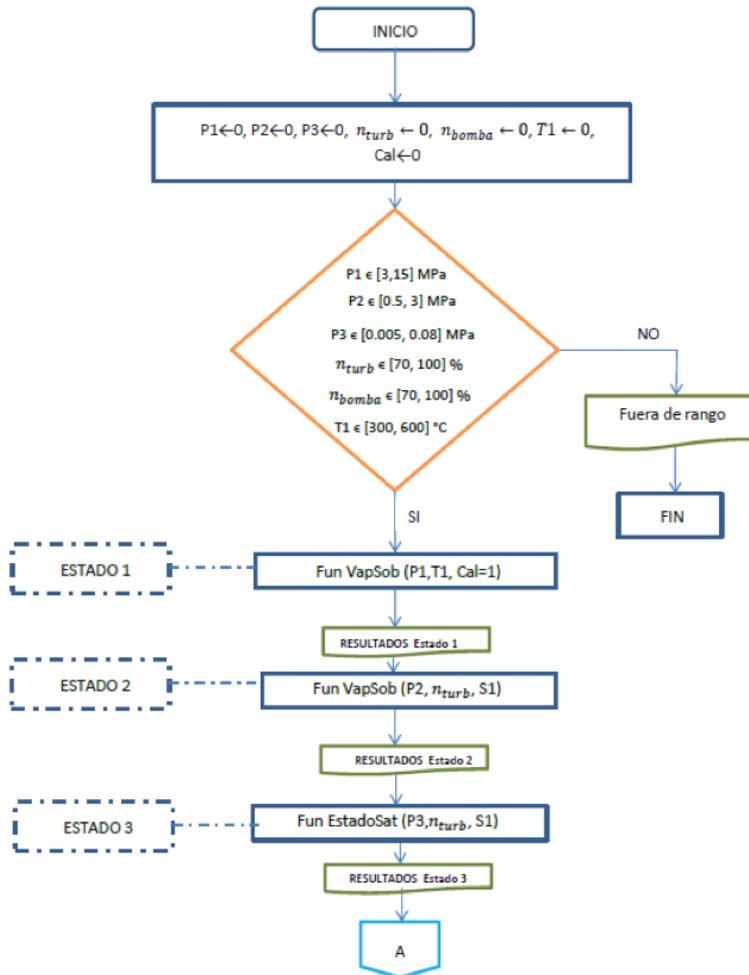
Figura 5. Resultados del ejercicio 9-29.

Fuente: Elaborada por los autores.

13 Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 4th. ed. México: McGraw-Hill, 2003.

D.2. Diseño del algoritmo de la aplicación ciclo Rankine con regeneración

La explicación del algoritmo de la aplicación del Ciclo Rankine con regeneración se muestra de forma resumida en la Figura 6, además de mostrar las variables de entrada y sus respectivos rangos.



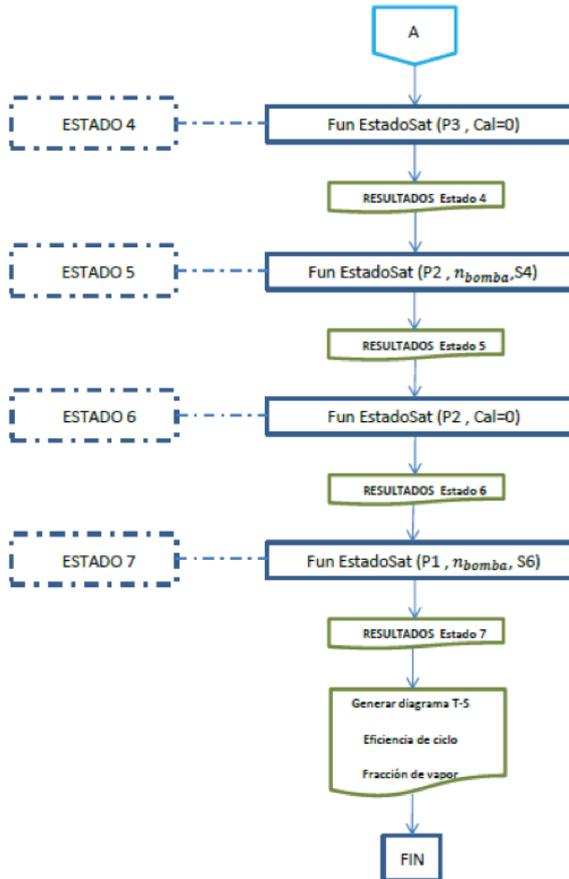


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación Rankine con regeneración.

Fuente: Elaborada por los autores.

•Explicación del algoritmo

Los diferentes estados que se encuentran en el ciclo Rankine con regeneración son similares a los anteriores ciclos ya mostrados, por lo cual

no se describen los diferentes estados, lo único que hay que observar es la inclusión de la fracción de vapor que es una variable a buscar.

D.2.1. Diseño de la interfaz de la ventana de Ciclo Rankine con Regeneración

Se muestra en la Figura 7 la ventana de aplicación del Ciclo Rankine con regeneración, en la parte izquierda se encuentra el panel con las variables de entrada; en la parte central hay un esquema representativo del ciclo Rankine con regeneración; en la parte derecha se encuentra el espacio donde se grafica los resultados en el diagrama T-s; en la parte inferior se muestra el panel con los resultados de la aplicación; por último se encuentra en la parte derecha inferior el resultado de la eficiencia del ciclo, la fracción de vapor y los botones de Regresar y cerrar.

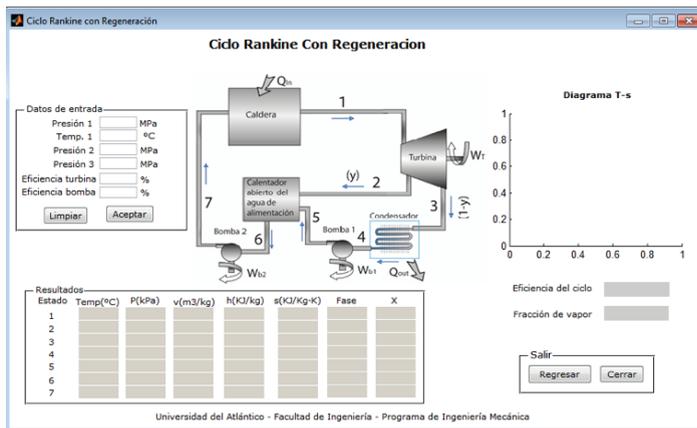


Figura 7. Ventana de la aplicación Ciclo Rankine con Regeneración.

Fuente: Elaborada por los autores.

D.2.2. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 16-38:** Un ciclo de potencia de vapor ideal funciona con la siguiente condición: El vapor de agua entra a 120 bar y 600 °C se expande hasta 10 bar, donde se sangra una parte y se lleva a un único calentador

abierto, expandiéndose el resto hasta 0.08 bar. Determínese (1) la fracción de corriente total sangrada hacia el calentador y (2) el rendimiento térmico del ciclo¹⁴.

En la Tabla 9 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con Power Cycle V.2.0 y los resultados proporcionados en el texto.

Parámetros	Datos reportados literatura	Power Cycle V.2.0	Error
eciclo	46.00%	45.98%	0.043%
fraction	0.217	0.217	0%

Tabla 9. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Power Cycle V.2.0 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 16-38.

Fuente: Elaborada por los autores.

Los resultados del ejercicio 16-38 se observan en la Figura 8.

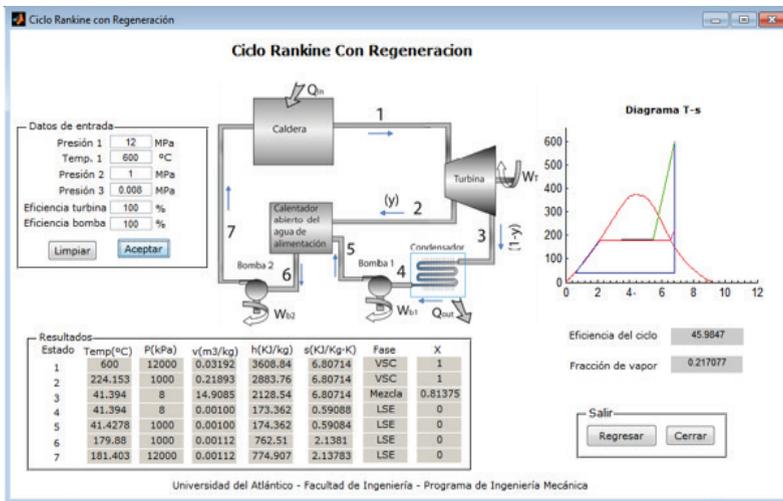


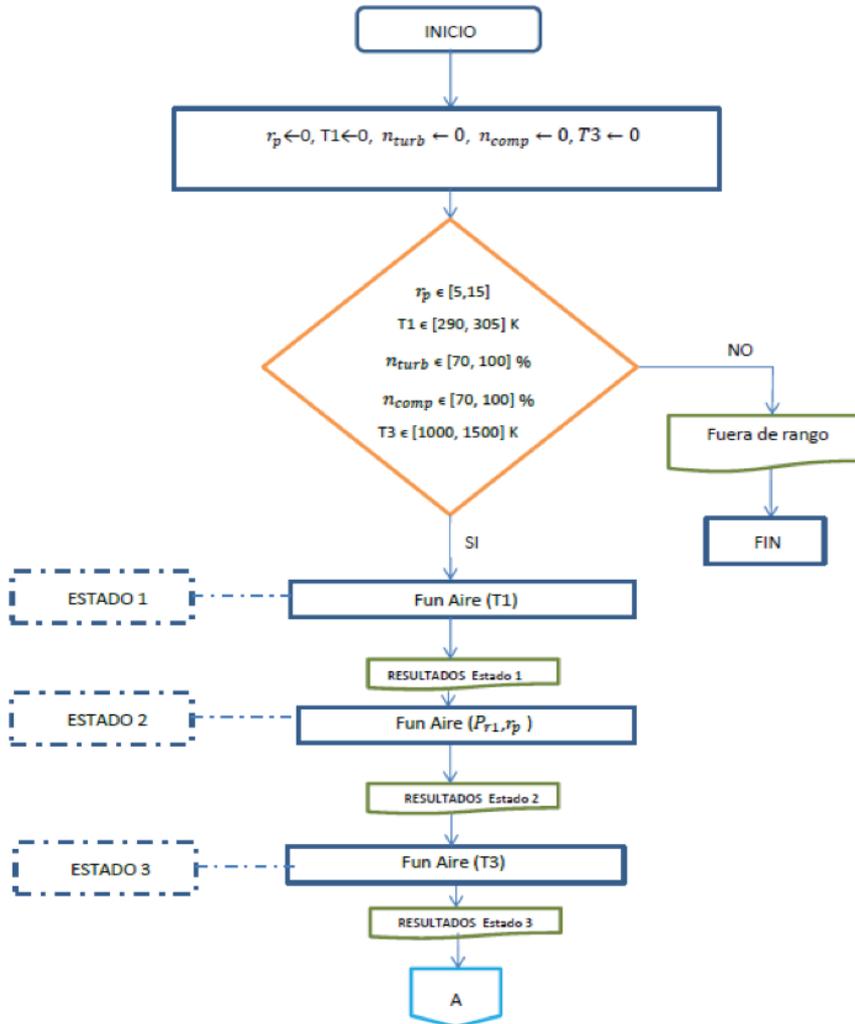
Figura 8. Resultados del ejercicio 16-38.

Fuente: Elaborada por los autores.

14 K. Wark and D. E. Richards, Termodinámica, 6th. ed. España: McGraw-Hill Interamericana, 2001.

D.3. Diseño del algoritmo de la aplicación ciclo Brayton

La explicación del algoritmo de la aplicación del Ciclo Brayton se muestra de forma resumida en la Figura 9, además de mostrar las variables de entrada y sus respectivos rangos de validez.



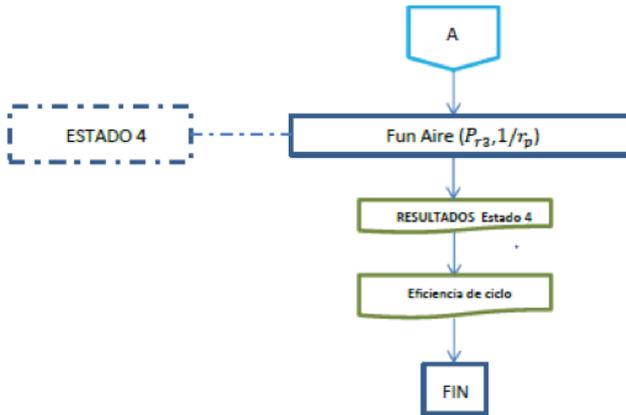


Figura 9. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación Ciclo Brayton.

Fuente: Elaborada por los autores.

•Explicación del algoritmo

La explicación de este algoritmo es diferente a la de los anteriores ciclos, se utiliza otras funciones para encontrar las propiedades de cada estado.

Estado 1: Con la variable de entrada T_1 se entra en la función Fun Aire, y se calcula las propiedades v_{r1} , h_1 , s_{01} , u_1 y p_{r1} .

Estado 2: Primero se calcula la variable que se halla con $p_{r2s} = rp * p_{r1}$ con esta variable se entra a la función Fun Aire y se trae las demás propiedades del estado, pero $h_2 = \left(\frac{h_{2s}}{h_1}\right) / \left[\left(\frac{n_{comp}}{100}\right) + h_1\right]$.

Estado 3: Con la variable de entrada se entra en la función Fun Aire, y se calcula las propiedades v_{r3} , h_3 , s_{03} , u_3 y p_{r3} .

Estado 4: Primero se calcula la variable p_{r4s} que se halla con $p_{r4s} = \left(\frac{1}{rp}\right) * p_{r3}$ con esta variable se entra a la función Fun Aire y se trae las demás propiedades del estado, pero $h_4 = h_3 - \left[h_3 - h_{4s}\right] * \left(\frac{n_{turb}}{100}\right)$.

D.3.1. Diseño de la interfaz de la ventana de Ciclo Brayton

Se observa en la Figura 10 la ventana de aplicación del Ciclo Brayton, en el segmento izquierdo se encuentra el panel con las variables de entrada, en el segmento derecho se muestra un esquema representativo del ciclo Brayton y en el segmento inferior está el panel con los resultados de la aplicación y la eficiencia del ciclo.

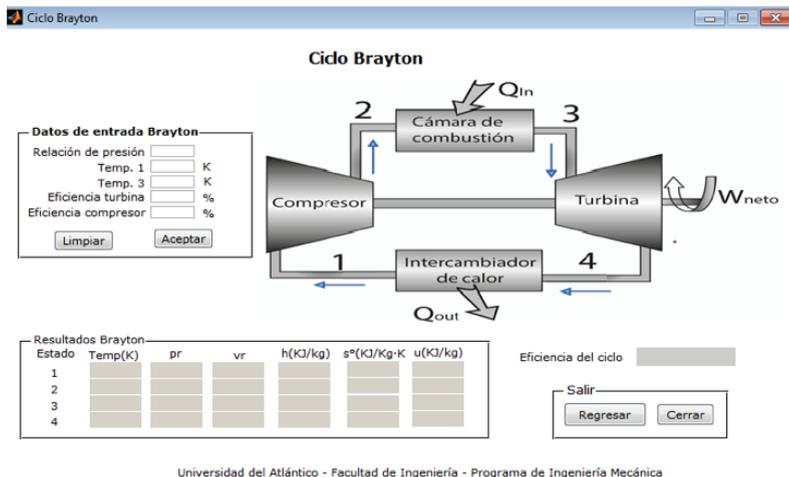


Figura 10. Ventana de la aplicación Ciclo Brayton.

Fuente: Elaborada por los autores.

D.3.2. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 9.25:** Considere un ciclo Brayton de aire-estándar ideal con las temperaturas mínima y máxima de 300 K y 1400 K, para relación de compresión de 8 y rendimiento isoentrópico del 80% en la turbina y el compresor. Determine el rendimiento térmico¹⁵.

En la Tabla 10 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con Power Cycle V.2.0 y los resultados proporcionados en el texto.

15 M. J. Moran and H. N. Shapiro, Fundamentos de termodinámica técnica, 2nd. ed. España: Editorial Reverté, 2004.

Los resultados del ejercicio 9.25 se observan en la Figura 11.

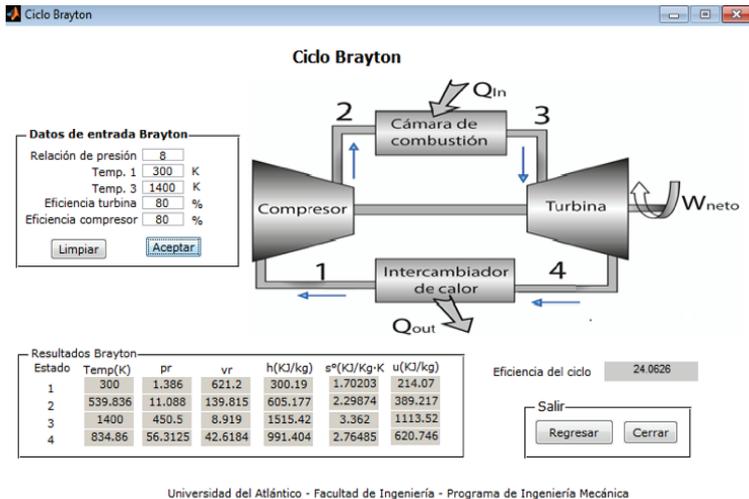


Figura 11. Resultados del ejercicio 9.25.

Fuente: Elaborada por los autores.

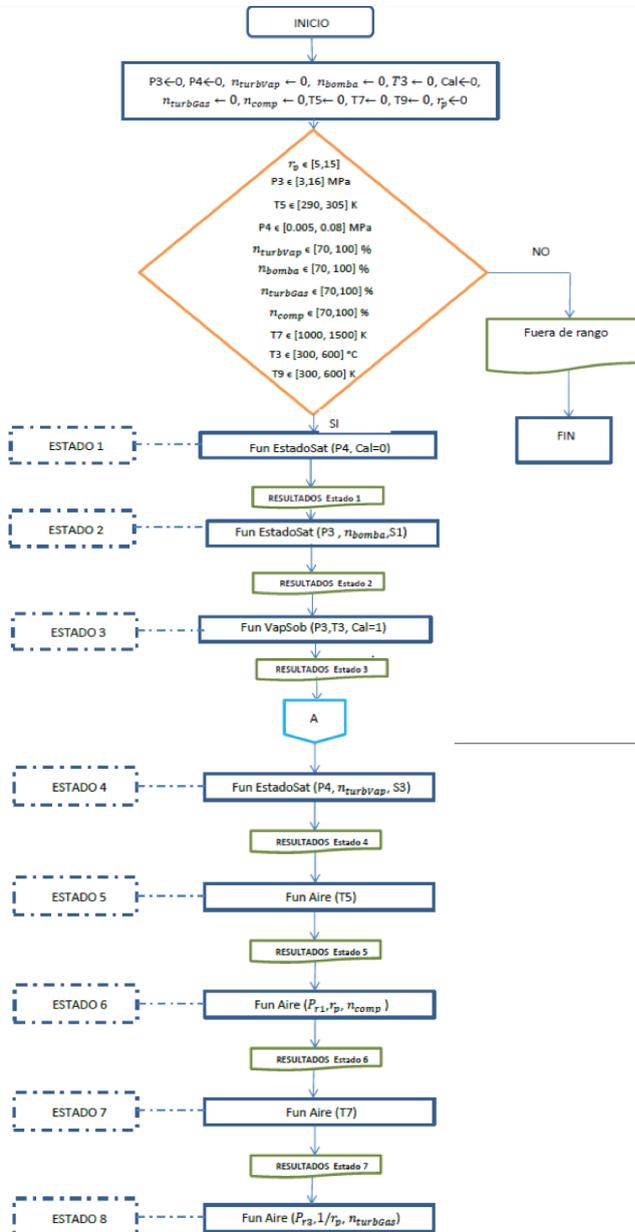
Ejercicio	Datos reportados literatura	Power Cycle V.2.0	Error
9.25	24.10%	24.06%	0.16%

Tabla 10. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Power Cycle V.2.0 y los datos reportados en la literatura de los diferentes ejercicios.

Fuente: Elaborada por los autores.

D.4. Diseño del algoritmo de la aplicación Ciclo Combinado: Brayton – Rankine Simple

La explicación del algoritmo de la aplicación del Ciclo combinado: Brayton – Rankine simple se observa de forma simplificada en la Figura 12, asimismo se observan las variables de entrada y sus respectivos rangos de validez.



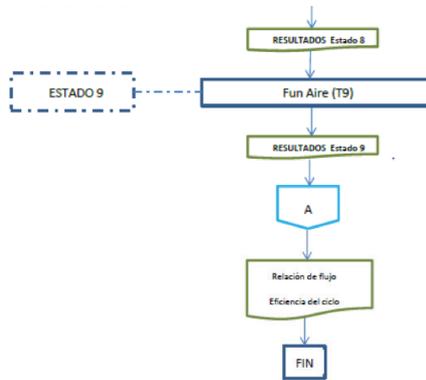


Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación Ciclo Combinado: Brayton -Rankine simple.

Fuente: Elaborada por los autores.

•Explicación del algoritmo

Para este ciclo se aplican los algoritmos de ciclo Rankine simple y el del ciclo Brayton explicados anteriormente. Aparece una nueva variable de salida que es la relación de flujo.

D.4.1. Diseño de la interfaz de la ventana de Ciclo Combinado: Brayton – Rankine Simple

Se observa en la Figura 13 la ventana de aplicación del Ciclo combinado: Brayton – Rankine simple, en el segmento izquierdo se encuentra el panel con los datos de entrada del ciclo Rankine simple, y en la parte derecha está el panel con los datos de entrada del ciclo Brayton; en el segmento derecho se muestra un esquema representativo del ciclo combinado, debajo esta los resultado de relación de flujos y la eficiencia del ciclo y en el segmento inferior está los paneles con los resultados del ciclo Rankine simple y Brayton.

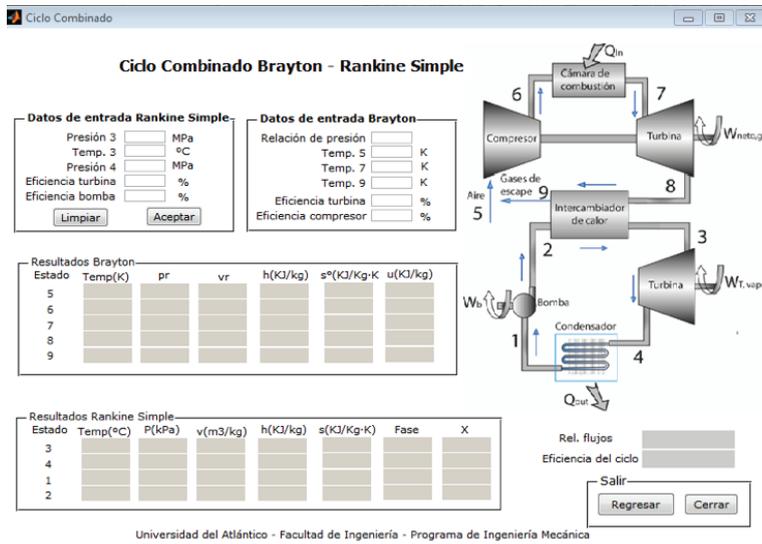


Figura 13. Ventana de la aplicación Ciclo Combinado: Brayton – Rankine Simple.

Fuente: Elaborada por los autores.

D.4.2. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 16-98:** Una planta de potencia de turbina de gas trabaja con una relación de presiones 13:1 y unas temperaturas de entrada al compresor y la turbina de 290 K y 1440 K respectivamente. Los rendimientos adiabáticos del compresor y la turbina son del 84 y el 88 por 100 respectivamente. Los gases de escape de la turbina empleados como fuente de energía del ciclo de vapor, salen del cambiador de calor a 500 K. las condiciones de entrada a la turbina del ciclo de vapor, cuyo rendimiento es el 86 por 100 son 160 bar y 560 °C. La presión del condensador es 0.08 bar y el rendimiento adiabático de la bomba es del 70 por 100. Determine (a) la relación adimensional entre los flujos máscicos de vapor de agua y aire y (b) el rendimiento térmico total del ciclo combinado¹⁶.

16 K. Wark and D. E. Richards, Termodinámica, 6th. ed. España: McGraw-Hill Interamericana, 2001.

En la Tabla 11 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con Power Cycle V.2.0 y los resultados proporcionados en el texto.

Los resultados del ejercicio 16-98 se observan en la Figura 14.

Parámetros	Datos reportados literatura	Power Cycle V.2.0	Error
eciclo	50.60%	50.52%	0.16%
rel.flu	0.1126	0.1125	0.09%

Tabla 11. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Power Cycle V.2.0 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 16-98.

Fuente: Elaborada por los autores.

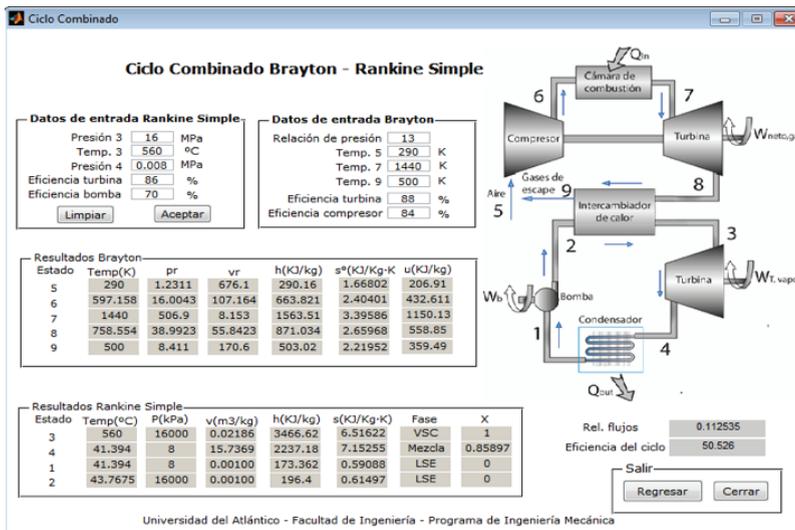


Figura 14. Resultados del ejercicio 16-98.

Fuente: Elaborada por los autores.

Anexo E. Aplicaciones del software Refri-term V.2.0

E.1. Diseño del algoritmo de la aplicación ciclo de refrigeración por cascada

El ciclo de refrigeración por cascada maneja entre veces dos refrigerantes, en este software se trabajó con el refrigerante 134a para los ciclos superior e inferior. Se muestra de forma reducida la explicación del algoritmo en la Figura 15.

•**ESTADO 1:** Para el cálculo del primer estado es necesario entregar a la función EstadoSat los valores de las variables P_1 y Cal, donde Cal = 1 y P_1 igual al valor ingresado por el usuario.

•**ESTADO 2:** Con las variables de entrada P_2 , Cal = 1, S_1 y n_{comp1} podemos entrar a calcular el estado en la función VapSob.

•**ESTADO 3:** El estado tres se encuentra en líquido subenfriado, por lo tanto se utiliza la P_2 y Cal con un valor igual a cero para entrar a la función EstadoSat.

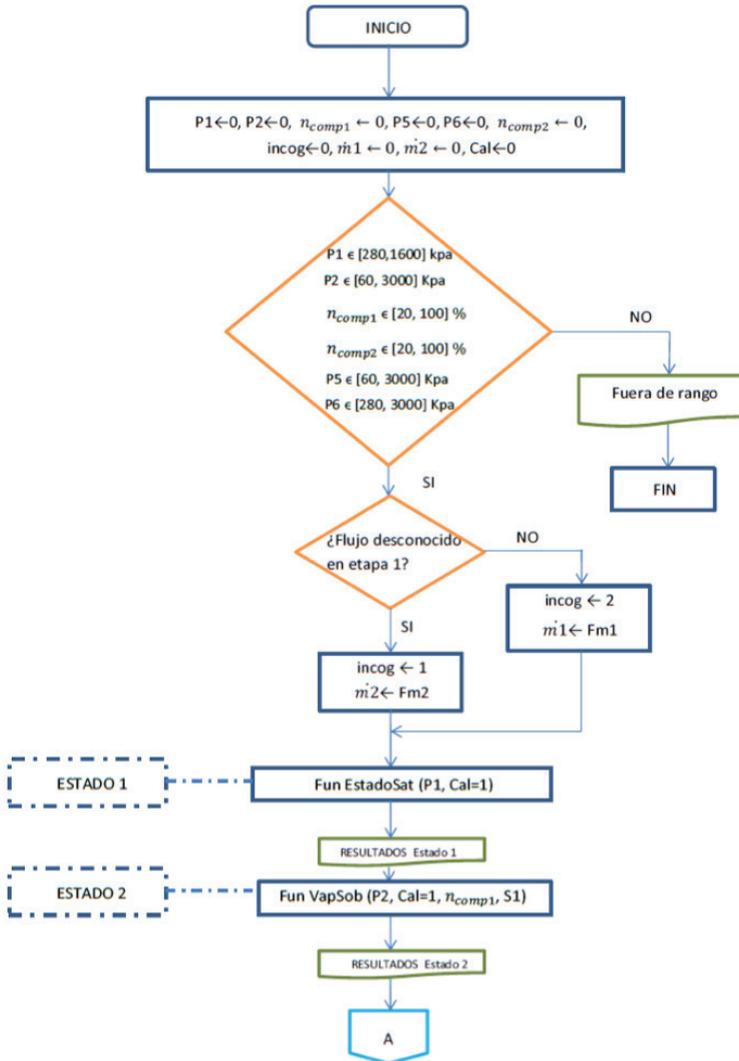
•**ESTADO 4:** El estado final se encuentra en mezcla que se genera al estrangular al refrigerante en el estado 3 hasta la presión de baja P_1 , por lo cual la entalpía del estado tres H_3 es la misma en que en el estado 4, por lo tanto con P_1 y H_3 entramos a la función EstadoSat que nos entrega los valores para la mezcla.

•**ESTADO 5:** Para el cálculo del primer estado es necesario entregar a la función EstadoSat los valores de las variables P_2 y Cal, donde Cal = 1 y P_2 igual al valor ingresado por el usuario.

•**ESTADO 6:** Con las variables de entrada P_3 , Cal = 1, n_{comp2} y podemos entrar a calcular el estado en la función VapSob.

•**ESTADO 7:** El estado tres se encuentra en líquido subenfriado, por lo tanto necesita con la P_2 y Cal con un valor igual a cero para entrar a la función EstadoSat.

•**ESTADO 8:** El estado final se encuentra en mezcla que se genera al estrangular al refrigerante en el estado 7 hasta la presión de baja P_2 , por lo cual la entalpía del estado ocho H_8 es la misma en que en el estado 7, por lo tanto con P_2 y H_7 entramos a la función EstadoSat.



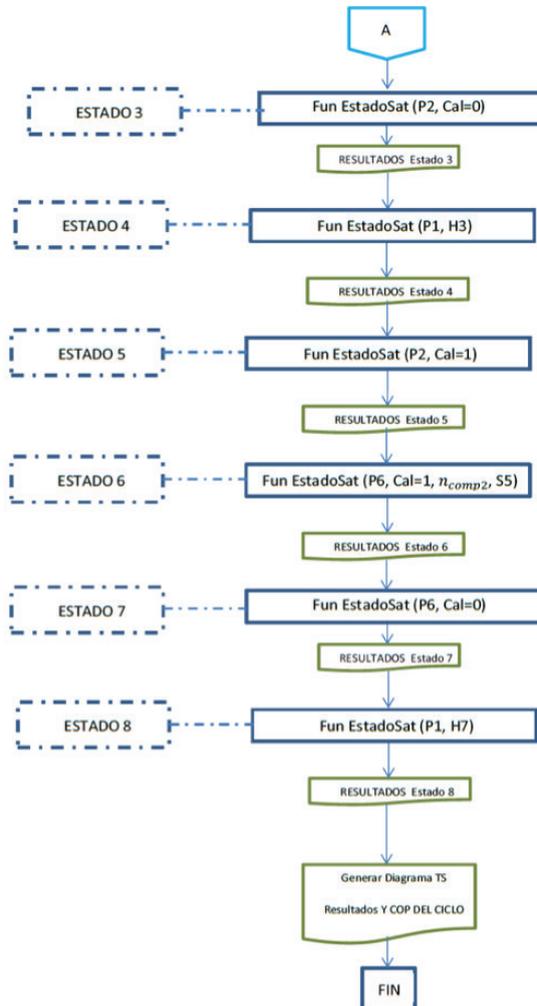


Figura 15. Diagrama de flujo del algoritmo para el ciclo de refrigeración por cascada.

Fuente: Elaborada por los autores.

E.1.1. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 11-49:** Considere un sistema de refrigeración en cascada de dos etapas que opera entre los límites de presión de 1.2 MPa y 200 kPa con refrigeración 134a como fluido de trabajo. El rechazo de calor del ciclo inferior al superior tiene lugar en un intercambiador de calor adiabático a contracorriente en donde las presiones en los ciclos superior e inferior son 0.4 y 0.5 MPa, respectivamente. En ambos ciclos el refrigerante es un líquido saturado a la salida del condensador y un vapor saturado a la entrada del compresor, y la eficiencia isentrópica del compresor es 80%. Si el flujo másico del refrigerante en el ciclo inferior es 0.15 kg/s, determine a) el flujo másico del refrigerante a través del ciclo superior, b) la tasa de remoción del espacio refrigerado y c) el COP de este refrigerador¹⁷.

En la Tabla 12 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con Refri-term V.2.0 y los resultados proporcionados en el texto.

Los resultados del ejercicio 11-49 se observan en la Figura 16.

Datos reportados literatura	Refri-term V.2.0	Error
0.2120 kg/s	0.2119 kg/s	0.047%
25.70 kW	25.67 kW	0.12%
2.68	2.68	0%

Tabla 12. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Refri-term V.2.0 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 11-49.

Fuente: Elaborada por los autores.

¹⁷ Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 6th. ed. México: McGraw-Hill, 2009.

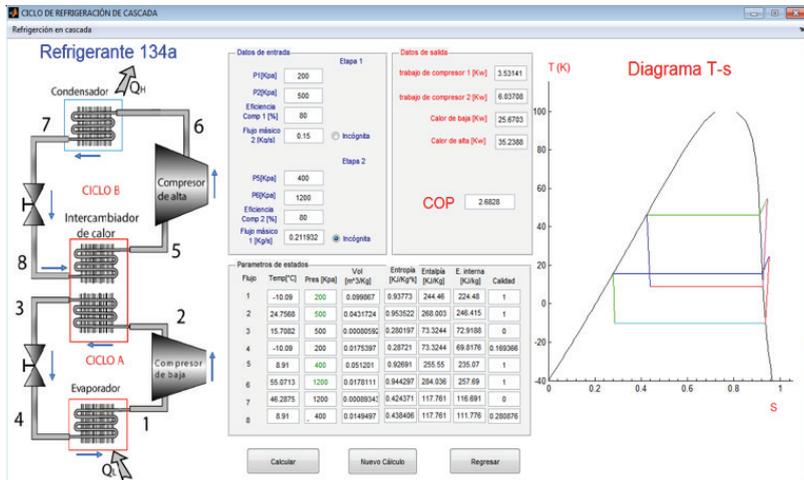


Figura 16. Resultados del ejercicio 11-49.

Fuente: Elaborada por los autores.

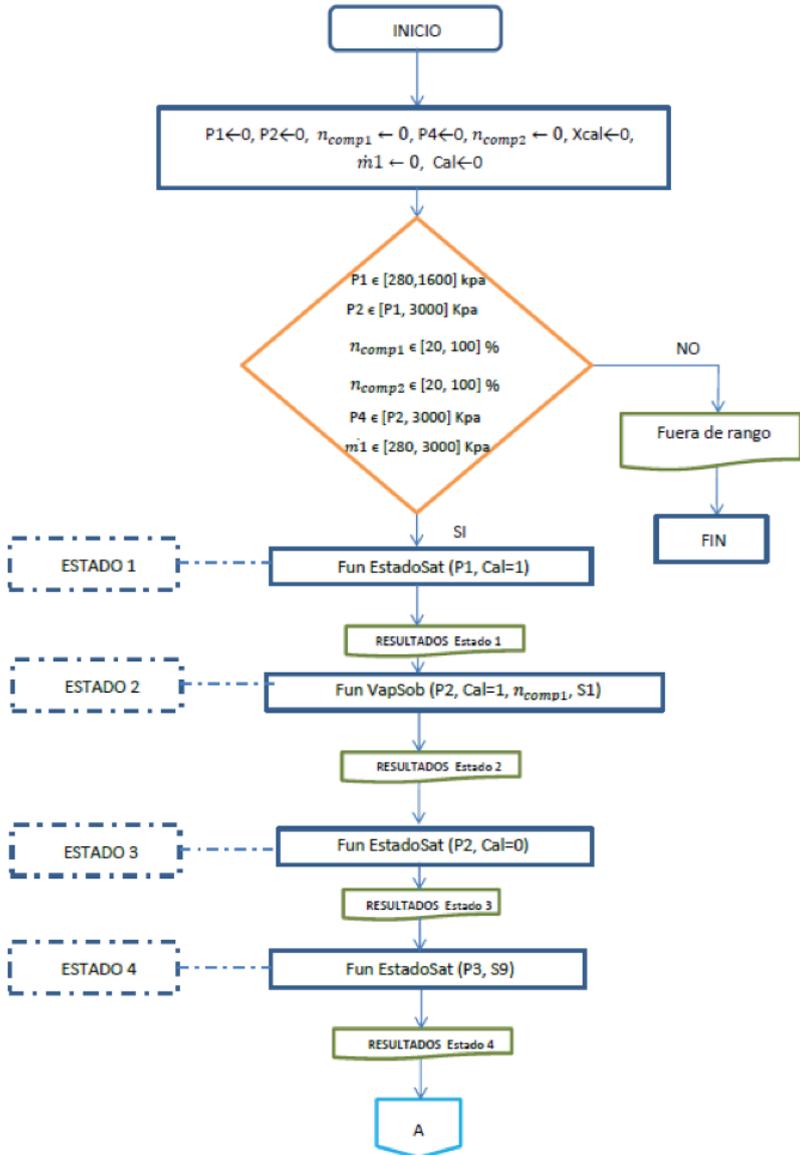
E.2. Diseño del algoritmo de la aplicación ciclo de refrigeración multietapas

A diferencia del ciclo de refrigeración en cascada el ciclo de múltiples etapas el refrigerante es el mismo en todas las etapas de este. En este ciclo se adiciona el estado 9 el cual observamos en la Figura 18 es formado por la mezcla entre el vapor saturado que viene de la cámara de vaporización instantánea y el vapor sobrecalentado que sale del compresor de baja, esto último es un proceso de regeneración. El algoritmo del programa se desarrolló en base a los algoritmos de los ciclos anteriores agregando las modificaciones como vemos en la Figura 17 por sus características propias mencionadas anteriormente.

•**ESTADO 1:** Para el cálculo del primer estado es necesario entregar a la función EstadoSat los valores de las variables P_1 y Cal , donde $Cal = 1$ y igual al valor ingresado por el usuario.

•**ESTADO 2:** Con las variables de entrada P_2 , $Cal = 1$, $S_{1n_{comp1}}$ y podemos entrar a calcular el estado en la función VapSob.

- ESTADO 3:** El estado tres se encuentra en vapor saturado, por lo tanto se utiliza P_2 la y $Cal = 1$ para entrar a la función EstadoSat.
- ESTADO 4:** Con las variables de entrada P_3 , $Cal = 1$, y n_{comp2} podemos entrar a calcular el estado en la función VapSob.
- ESTADO 5:** El estado cinco se encuentra en líquido subenfriado, por lo tanto se utiliza la P_3 y $Cal = 0$ para entrar a la función EstadoSat.
- ESTADO 6:** El estado seis se encuentra en mezcla que se genera al estrangular al refrigerante en el estado 5 hasta la presión media P_2 , por lo cual la entalpía del estado seis H_6 es la misma en que en el estado 5, así con P_2 y H_5 entramos a la función EstadoSat.
- ESTADO 7:** El estado tres se encuentra en líquido subenfriado, por lo tanto necesita con la P_2 y $Cal = 0$ para entrar a la función EstadoSat.
- ESTADO 8:** El estado final se encuentra en mezcla que se genera al estrangular al refrigerante en el estado 7 hasta la presión de baja P_1 , por lo cual la entalpía del estado ocho H_8 es la misma en que en el estado 7, por lo tanto con P_1 y H_7 entramos a la función EstadoSat.
- ESTADO 9:** El estado final se encuentra en vapor sobrecalentado y se calcula con las variables P_2 , H_2 , H_3 y X_{cal} , donde esta última es la fracción de vapor saturado siendo $(1 - X_{cal})$ la fracción de vapor sobrecalentado. Con estas variables se entra a la función RegeVap.



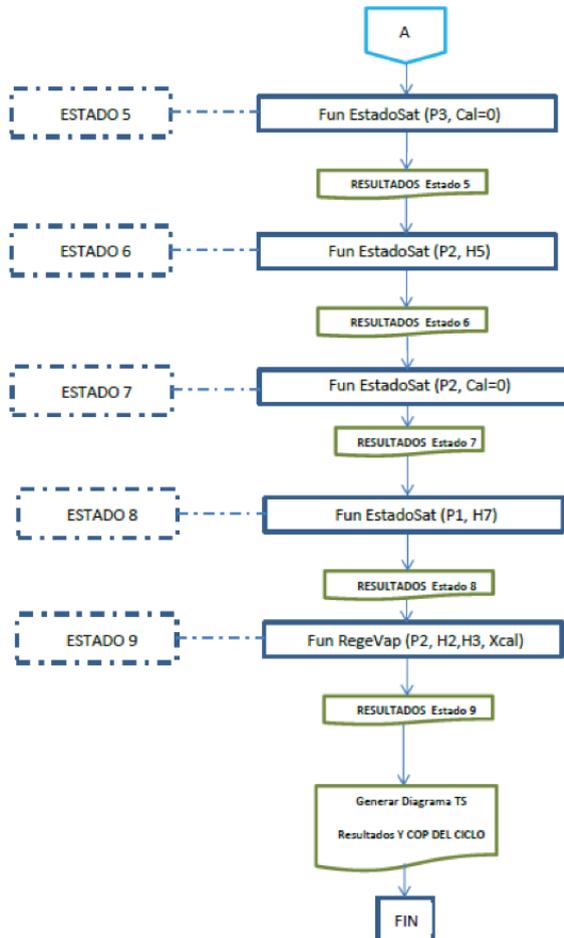


Figura 17. Diagrama de flujo del algoritmo para el ciclo de refrigeración multietapas.

Fuente: Elaborada por los autores.

E.2.1. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 11-57:** Un sistema de refrigeración por compresión dos etapas opera con refrigerante 134a entre los límites de presión de 1.4 y 0.10 MPa.

El refrigerante sale del condensador como líquido saturado y se estrangula a una cámara de autoevaporación a 0.4 MPa. El vapor de la cámara de vaporización instantánea se comprime luego a la presión del condensador mediante el compresor de alta presión, y el líquido se estrangula a la presión del evaporador. Suponiendo que el refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y que ambos compresores son isentrópicos, determine a) la fracción del refrigerante que se evapora cuando se le estrangula a la cámara de vaporización instantánea, b) la tasa de remoción de calor del espacio refrigerado para un flujo másico de 0.25 kg/s a través del condensador y c) el coeficiente de desempeño¹⁸.

En la Tabla 13 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con Refri-term V.2.0 y los resultados proporcionados en el texto.

Los resultados del ejercicio 11-57 se observan en la Figura 18.

Datos reportados literatura	Refri-term V.2.0	Error
0.3303	0.3301	0.06%
28.55 kW	28.55 kW	0%
2.50	2.50	0%

Tabla 13. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Refri-term V.2.0 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 11-57.

Fuente Autores.

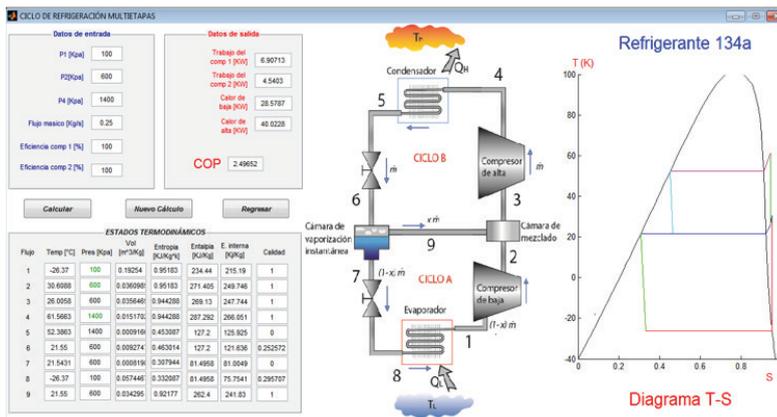


Figura 18. Resultados del ejercicio 11-57.

Fuente: Elaborada por los autores.

18 Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 7^{ma}. ed. México: McGraw-Hill, 2012.

E.3. Diseño del algoritmo de la aplicación ciclo de refrigeración por absorción

El ciclo de refrigeración por absorción es en general parecido a ciclo de refrigeración simple, pero reemplazando el compresor por un sistema de elementos que por medio de reacciones químicas entre el refrigerante (Amoniaco) y la sustancia de medio de transporte (agua) aprovechan el calor de alguna fuente de calor externa que este entre 100° y 200° a un bajo costo. El algoritmo del programa se desarrolló en base a los algoritmos del ciclo de refrigeración simple realizando las modificaciones observadas en la Figura 19 por sus características propias mencionadas anteriormente.

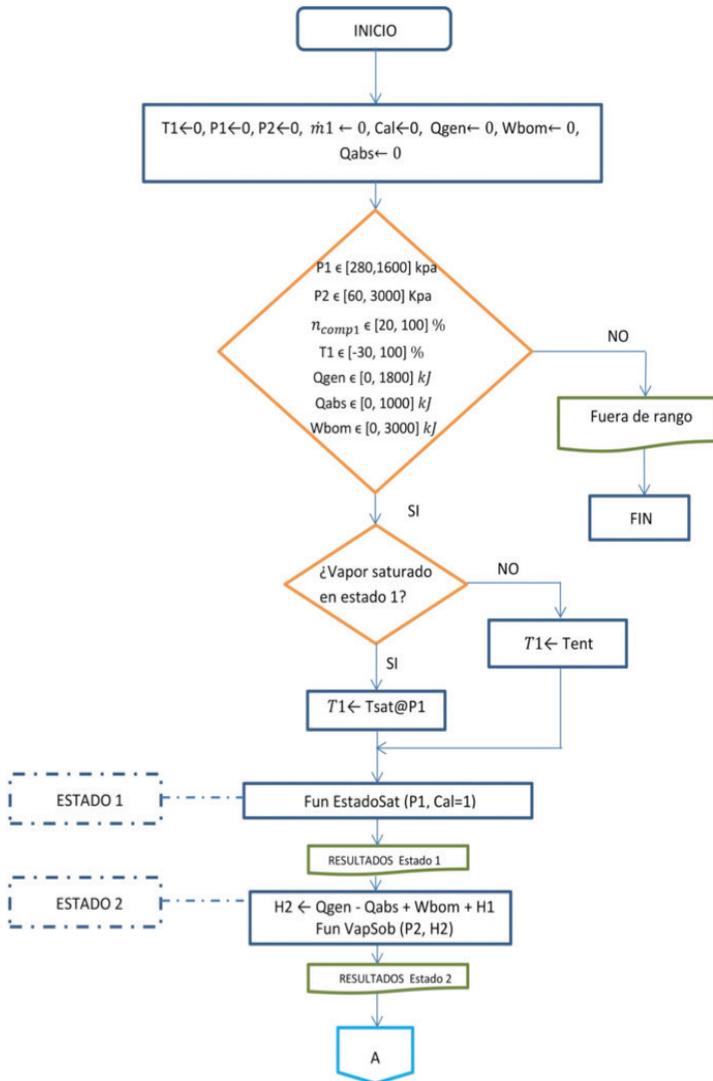
•**ESTADO 1:** Para el cálculo del primer estado es necesario entregar a la función EstadoSat los valores de las variables P_1 y Cal, donde Cal es igual a 1 y P_1 igual al valor ingresado por el usuario.

•**ESTADO 2:** Con las variables de entrada P_2 y H_2 que se calculan internamente con los valores de entrada suministrados para las variables Q_{gen} , Q_{abs} , W_{bomb} y H_1 la entalpía hallada para el estado 1, podemos entrar a calcular el estado en la función VapSob.

•**ESTADO 3:** El estado tres se encuentra en líquido subenfriado, por lo tanto se trabaja con la P_2 y $Cal = 0$ con un valor igual a cero para entrar a la función EstadoSat.

•**ESTADO 4:** El estado final se encuentra en mezcla que se genera al estrangular al refrigerante en el estado 3 hasta la presión de baja, por lo cual la entalpía del estado tres H_3 es la misma en que en el estado 4, por lo tanto con P_1 y H_3 entramos a la función EstadoSat.

Los intervalos de los valores de entrada para el trabajo de la bomba junto con el calor del absorbedor y generador fueron establecidos en base a la entalpía máxima que el refrigerante 134a entrega como dato de salida en el software y teniendo en cuenta que estos valores se suman directamente a la entalpía de salida para el estado 2 como vemos en la Figura 19.



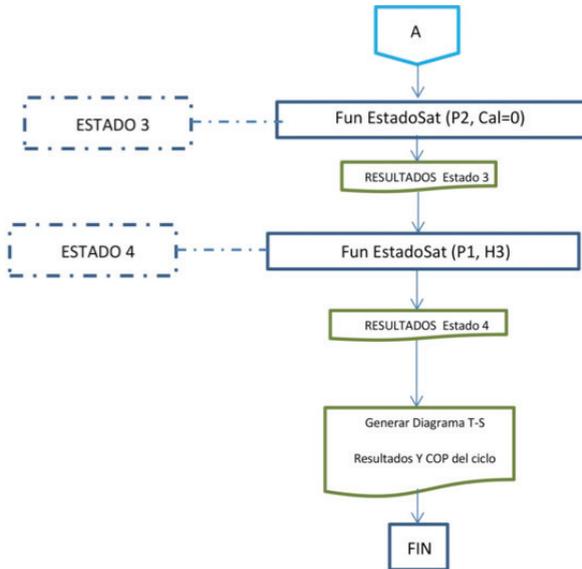


Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo para el ciclo de refrigeración por absorción.

Fuente: Elaborada por los autores.

E.3.1. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 11-90:** Un sistema de refrigeración por absorción que recibe calor de una fuente de 95°C y mantiene el espacio refrigerado a 0°C se asegura que tiene un COP de 3.1. Si la temperatura del entorno es de 19°C , ¿puede ser válida esa afirmación? ¹⁹.

En la Tabla 14 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con Refri-term V.2.0 y los resultados proporcionados en el texto.

Los resultados del ejercicio 11-90 se observan en la Figura 20.

¹⁹ Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 7^{ma}. ed. México: McGraw-Hill, 2012.

Ejercicio	Datos reportados literatura	Refri-term V.2.0	Error
11-90	2.970	2.967	0.1%

Tabla 14. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación Refri-term V.2.0 y los datos reportados en la literatura de los diferentes ejercicios.

Fuente: Elaborada por los autores.

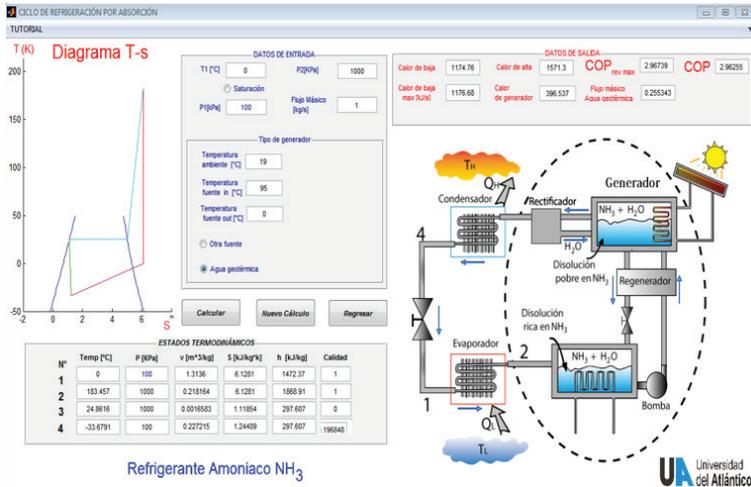


Figura 20. Resultados del ejercicio 11-90

Fuente: Elaborada por los autores.

Anexo F. Aplicaciones del software PSYCROFAST 2014

F.1. Diseño del algoritmo de la aplicación enfriamiento simple

La explicación del algoritmo de la aplicación enfriamiento simple se observa de forma simplificada en la Figura 21, asimismo se observan las variables de entrada y sus respectivos rangos de validez.

Para graficar en la carta psicrométrica aplican las mismas restricciones explicadas en el proceso de calentamiento simple. Cuando la temperatura de salida es menor a la temperatura de rocío, la aplicación enviara un mensaje, para que el usuario se dirija a la aplicación de enfriamiento con deshumidificación.

F.1.1. Diseño de la interfaz de la ventana enfriamiento simple

Para poder ingresar a la ventana de la aplicación enfriamiento simple, se le da click al botón de enfriamiento simple en la ventana principal de la aplicación PSYCROFAST 2014.

Se muestra en la Figura 22 la ventana de la aplicación de enfriamiento simple, consta de una barra de menú donde se encuentra “archivo” y “ayuda”, en archivo tenemos la posibilidad de visualizar la carta psicrométrica, y en ayuda nos muestra el tutorial del software. La ventana se divide en dos estados; estado 1 que es el de entrada y el estado 2 el de salida, y entre ellos se observa un esquema representativo del proceso.

F.1.2. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 12.42:** Una cantidad fija de aire inicialmente a 40 °C, 1 atm y 30% de humedad relativa se enfría a presión constante hasta 20 °C. Usando el diagrama psicrométrico, determine si se produce condensación. Evalúese la cantidad de agua condensada, en kg por kg de aire seco, o si no hay condensación. Determine la humedad relativa en el estado final²⁰.

20 M. J. Moran and H. N. Shapiro, Fundamentos de termodinámica técnica, 2nd. ed. España: Editorial Reverté, 2004

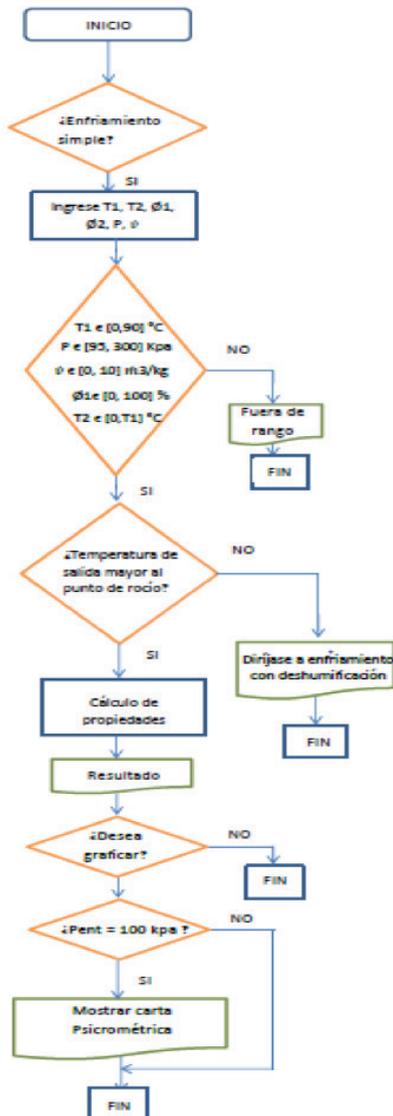


Figura 21. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación enfriamiento simple.

Fuente: Elaborada por los autores.

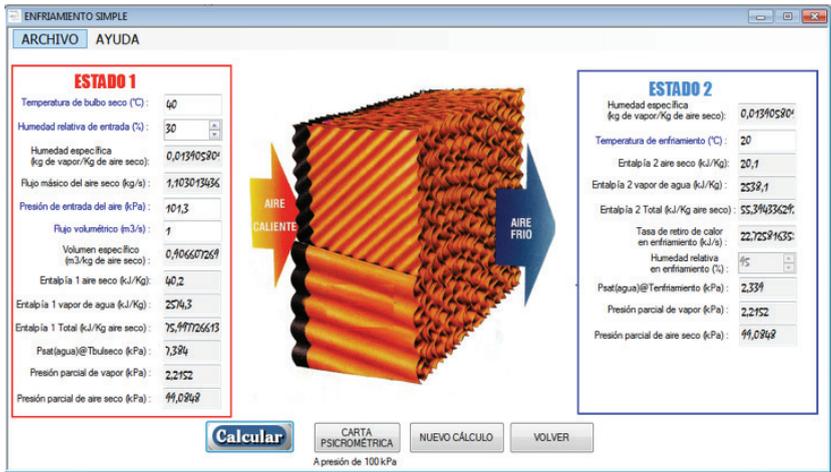


Figura 22. Resultados del ejercicio 12.42

Fuente: Elaborada por los autores.

En la Tabla 15 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con PSYCROFAST 2014 y los resultados proporcionados en el texto.

Datos reportados literatura	PSYCROFAST 2014	Error
95%	95%	0%

Tabla 15. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación PSYCROFAST 2014 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 12.42.

Fuente: Elaborada por los autores.

Se realizó el ejercicio en la aplicación de enfriamiento simple, y no hubo ningún mensaje de que la temperatura era menor a la de rocío, por lo tanto, no hay condensación.

También se puede observar en la Figura 23, los resultados del ejercicio 12.42 graficados en la carta psicrométrica.

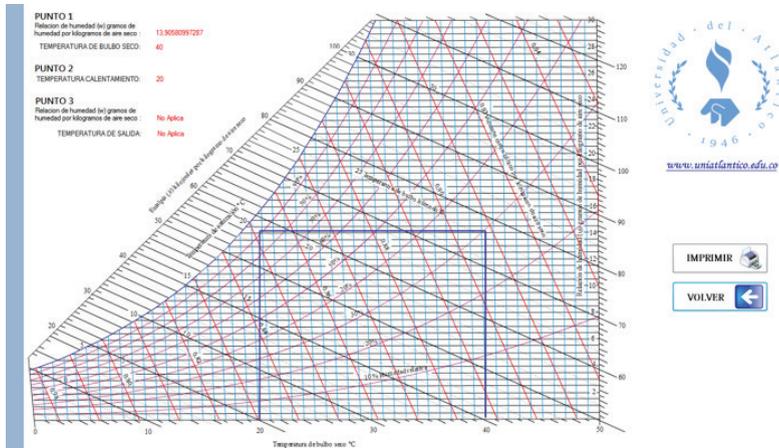


Figura 23. Resultados del ejercicio 12.42 graficados en la carta psicrométrica. Fuente: Elaborada por los autores.

F.2. Diseño del algoritmo de la aplicación calentamiento con humidificación

La explicación del algoritmo de la aplicación calentamiento con humidificación se muestra de forma simplificada en la Figura 24, también se muestra las diferentes variables de entradas con sus respectivos rangos de aplicación.

Para graficar en la carta psicrométrica aplican las mismas restricciones explicadas en los anteriores procesos.

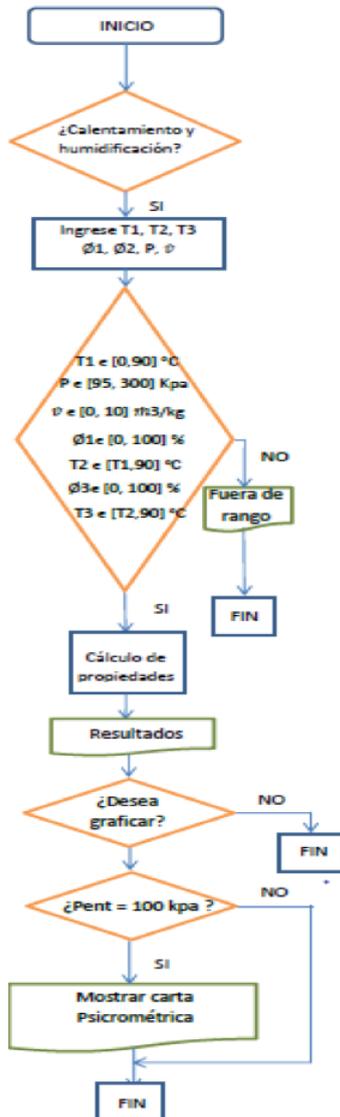


Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación calentamiento con humidificación.

Fuente: Elaborada por los autores.

F.2.1. Diseño de la interfaz de la ventana calentamiento con humidificación

Se observa en la Figura 25 la ventana de la aplicación de calentamiento con humidificación. La ventana se divide en tres estados; estado 1 que es el de entrada, el estado 2 cuando se pasa la sección de calentamiento y el estado 3 cuando se sale de la sección de humidificación, en el lado derecho de la ventana se observa la página principal msn el tiempo²¹ con la ubicación de Barranquilla ya preestablecida, esto sirve como guía para conocer las temperaturas de bulbo seco, húmedo y las humedades relativas de diferentes ciudades, para fines educativos.

F.2.2. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 14-78:** Aire a 1 atm, 15 °C y 60% de humedad relativa se calienta primero a 20 °C y luego se humidifica por introducción de vapor de agua. El aire sale de la sección de humidificación a 25 °C y 65% de humedad relativa. Determine a) la cantidad de vapor que se agrega al aire y b) la cantidad de calor que se transfiere al aire en la sección de calentamiento²².

En la Tabla 16 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con PSYCROFAST 2014, y los resultados proporcionados en el texto.

Datos reportados literatura	PSYCROFAST 2014	Error
0.0065 kg H ₂ O/ kg aire seco	0.0065 kg H ₂ O/ kg aire seco	0%
5.10 kJ/kg aire seco	5.09 kJ/kg aire seco	0.19%

Tabla 16. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación PSYCROFAST 2014 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 14-78.

Fuente: Elaborada por los autores.

21 Página principal de msn el tiempo: <http://www.msn.com/es-co/el-tiempo/hoy/Barranquilla,Atla-Ntico,Colombia/we-city-10.964,-74.796?iso=CO> [Consultada el 04 de septiembre de 2015]

22 Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 6^a. ed. México: McGraw-Hill, 2009.

Se muestra en la Figura 26 los resultados graficados en la carta psicrométrica.

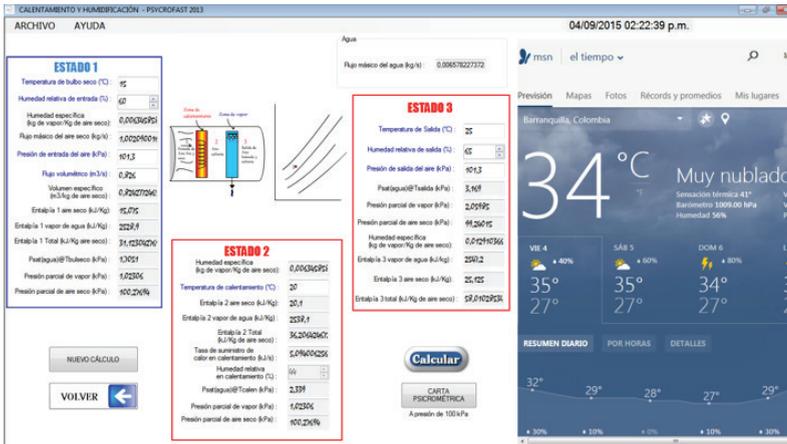


Figura 25. Resultados del ejercicio 14-78.

Fuente: Elaborada por los autores.

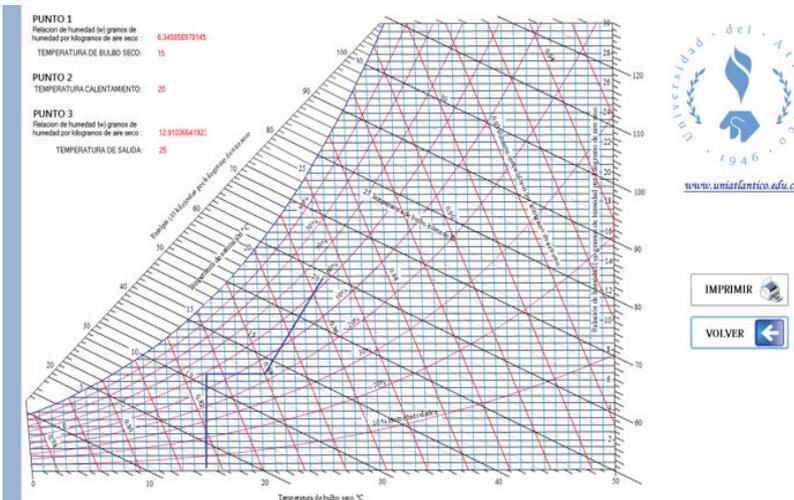


Figura 26. Resultados del ejercicio 14-78 graficados en la carta psicrométrica.

Fuente: Elaborada por los autores.

F.3. Diseño del algoritmo de la aplicación torres de enfriamiento

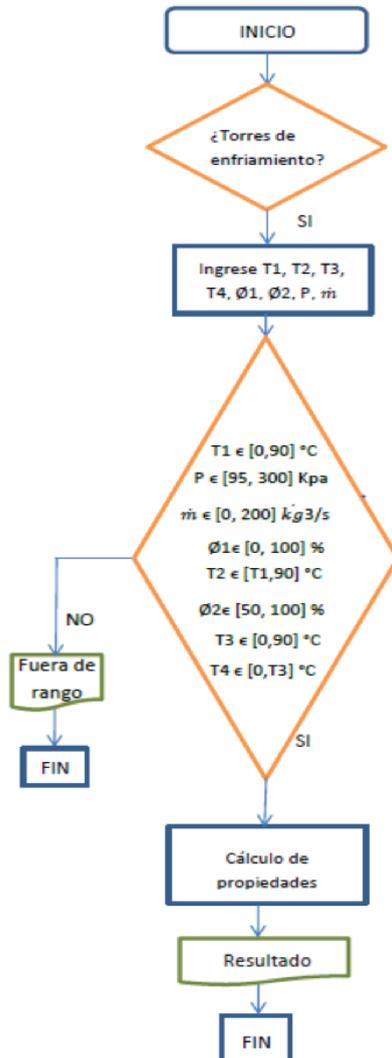


Figura 27. Diagrama de flujo del algoritmo para la aplicación torres de enfriamiento.

Fuente: Elaborada por los autores.

La explicación del algoritmo de la aplicación torres de enfriamiento se muestra de forma simplificada en la Figura 27, además se muestra las diferentes variables de entradas con sus respectivos rangos de aplicación.

F.3.1. Diseño de la interfaz de la ventana torres de enfriamiento

La ventana de la aplicación de torres de enfriamiento. La ventana se divide en cuatro estados; estado 1 es el de entrada de aire, el estado 2 es el de salida de aire, el estado 3 es entrada de agua a la torre y el estado 4 es la salida del agua, entre los estados se encuentra un esquema representativo del proceso.

F.3.2. Verificación de los resultados

•**Ejercicio 14-114:** Una torre de enfriamiento húmedo debe enfriar 40 kg/s de agua de 40°C a 30°C. El aire atmosférico entra a la torre a 1 atm, con temperaturas de bulbo seco y húmedo de 22 y 16°C, respectivamente y sale a 32°C con una humedad relativa de 95%. Usando la carta psicrométrica, determine a) el flujo volumétrico del aire de entrada de la torre de enfriamiento y b) el flujo másico del agua de reposición necesaria²³.

En la Tabla 17 se muestra la comparación de un ejercicio realizado con PSYCROFAST 2014 y los resultados proporcionados en el texto.

Datos reportados literatura	PSYCROFAST 2014	Error
0.568 kg/s	0.568 kg/s	0%
23.9 m ³ /s	23.9 m ³ /s	0%

Tabla 17. Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación PSYCROFAST 2014 y los datos reportados en la literatura del ejercicio 14-114.

Fuente: Elaborada por los autores.

23 Y. A. Çengel and M. A. Boles, Termodinámica, 7ma. ed. México: McGraw-Hill, 2012.

La presente publicación fue editada con el apoyo de la
Editorial UNIAUTÓNOMA en noviembre de 2018.

El libro fue desarrollado con la finalidad que los estudiantes de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Química y carreras afines logren alcanzar mayores capacidades en el área térmica. Aquí se tocan fenómenos que no se alcanzan a estudiar durante el desarrollo de una clase de termodinámica común que incluya laboratorios reales.

Permite a los estudiantes analizar muchas variables mediante la simulación de procesos específicos y entender las diferentes respuestas, permitiéndoles visualizar de una manera más general cualquier problema que se pudiese presentar en un proceso térmico y encontrar la solución lo más rápida y efectiva posible.



EDITORIAL
UNIAUTÓNOMA