

## Sistema Experto aplicado a la Enseñanza de Ciclos Termodinámicos

**Vanina E. Beraudo**

Facultad de Ingeniería - UNLPam  
vaninaberaudo@gmail.com

**Luis A. Gago**

Facultad de Ingeniería - UNLPam  
gagoluis@ing.unlpam.edu.ar

**Martín H. Echeverría**

Facultad de Ingeniería - UNLPam  
echeverriamh@gmail.com

**Natalia S. Stark**

Facultad de Ingeniería - UNLPam  
nstark@ing.unlpam.edu.ar

### Abstract

This article deals with an *expert system* application capable of determining the feasibility of operation of a thermic machine from the thermodynamic point of view, by means of the analysis of the design of a power cycle, the *Joule Brayton* cycle. Also, it intends to give Thermodynamic students an innovative tool which allows them to learn the fundamentals on the basis of their successes and mistakes, by spotting physically impossible designs, offering them the explanations that a good laboratory assistant would provide.

**Keywords:** Expert Systems, Thermodynamic, Thermodynamic Cycles, Knowledge Engineering

### Resumen

El presente artículo trata la aplicación de un *sistema experto* capaz de determinar la factibilidad de funcionamiento de una máquina térmica desde el punto de vista termodinámico, mediante el análisis del diseño de un ciclo de potencia, el *ciclo Joule Brayton*; y ofrecer a estudiantes de Termodinámica, en especial, una herramienta innovadora que les permita aprender principios fundamentales del dominio, en base tanto a sus aciertos como a sus errores, detectando diseños físicamente imposibles y proporcionándoles las explicaciones que un buen asistente de laboratorio les brindaría.

Se describen fases y etapas de la metodología empleada para construir el sistema, a fin de brindar al lector una idea general del mismo y de cómo el sistema trabaja.

**Palabras Claves:** Sistemas Expertos, Termodinámica, Ciclos Termodinámicos, Ingeniería del Conocimiento

## 1 INTRODUCCIÓN

Pedagógicamente, la enseñanza y el aprendizaje del análisis y diseño de ciclos termodinámicos es un problema importante [2], razonarlos requiere un amplio y profundo entendimiento de los fundamentos de Termodinámica, por lo cual el estudio de ciclos ocupa la mayor parte del entrenamiento práctico de estudiantes de ingeniería en las cátedras de Termodinámica. La experiencia en diseño se considera esencial para la educación en ingeniería y provee un contexto motivador poderoso para el aprendizaje de los principios físicos fundamentales: no se puede diseñar un motor de reacción, un refrigerador, o planta de potencia sin usar un amplio rango de principios físicos. Esta experiencia es difícil de transmitir en un aula típica porque muchos artefactos físicos interesantes (como plantas de poder, artefactos del motor de reacción, y refrigeradores) son caros o peligrosos para construir y experimentar con ellos.

Los Sistemas Basados en Conocimiento ó Sistemas Expertos (SE) emulan el comportamiento humano experto en un área de conocimiento determinada. Constituyen sistemas de ayuda a la toma de decisiones en áreas tan diversas como la selección de estrategias instruccionales [5], el control de variables ambientales [6], la configuración de ventiladores en neonatología [7], entre otras.

Este trabajo presenta una propuesta innovadora para el estudio de los ciclos termodinámicos, un SE que permite determinar la factibilidad de funcionamiento de una máquina térmica, mediante el análisis y diseño del ciclo Joule Brayton.

El ciclo Brayton es un ciclo de potencia de gas y es la base de las turbinas de gas. Tiene como función transformar energía que recibe en forma de calor en trabajo mecánico o potencia, si se lo refiere a unidades de tiempo.

El Sistema Experto sirve de guía y en especial de herramienta al usuario que comienza a trabajar con ciclos termodinámicos, detectando diseños imposibles de construir, en menos tiempo, especificando la causas que imposibilitan la construcción y ofreciendo la posibilidad de realizar cambios y /o ajustes sobre los valores para optimizar su rendimiento tal como lo haría una persona idónea en el tema.

El trabajo se organiza como sigue: la sección 2 describe el problema pedagógico que motiva la construcción del SE e incluye una breve descripción de qué son los ciclos termodinámicos y cómo ellos trabajan. La sección 3 presenta la descripción general de la solución propuesta al problema planteado en la sección anterior. La sección 4 detalla el proceso de adquisición de conocimientos. La etapa de conceptualización realizada a fin de obtener una representación de los conocimientos del experto se describe en la sección 5. La formalización de los conocimientos se expone en la sección 6. Posteriormente, la sección 7, muestra la etapa de implementación del sistema y la evaluación realizada al mismo. Finalmente, la sección 8 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

## 2 LA TAREA: ENSEÑAR EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE CICLOS TERMODINÁMICOS

En Termodinámica hay dos importantes áreas de aplicación, la generación de potencia y la refrigeración [1]. Ambas se realizan mediante sistemas que operan en un ciclo termodinámico, dentro del cual un fluido de trabajo sufre una serie de transformaciones para procesar energía.

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

Los ciclos termodinámicos también se categorizan como ciclos de gas o ciclos de vapor, dependiendo de la fase del fluido de trabajo, es decir, del estado de la sustancia que circula por el sistema.

Los ciclos termodinámicos pueden, incluso, categorizarse como ciclos cerrados o abiertos. En los ciclos cerrados el fluido de trabajo es regresado a su estado inicial al final de cada ciclo y se recircula. En los ciclos abiertos el fluido de trabajo se renueva al final de cada ciclo, en lugar de ser recirculado.

Para los ingenieros en Termodinámica, los ciclos termodinámicos juegan el mismo rol que los circuitos electrónicos para los ingenieros en electrónica: una cierta cantidad de partes, compresores, turbinas, intercambiadores de calor, son combinadas en red generando alternativas de diseño para un problema dado.

La Figura 1 muestra el diseño de un ciclo Joule Brayton cerrado. El ciclo opera de la siguiente manera: el fluido de trabajo entra a la cámara de combustión con la temperatura elevada en el estado  $e2$ , donde se le agrega energía mediante un proceso de presión constante, hasta que alcanza la temperatura elevada del estado  $e3$ . Entonces, el fluido entra a la turbina y tiene lugar una expansión isentrópica, produciendo cierta potencia. El fluido sale de la turbina al estado  $e4$  y pasa a ser enfriado, en un proceso a presión constante. En el enfriador, la temperatura baja, de donde sale al estado  $e1$ , listo para entrar al compresor. Ahí el fluido es comprimido isentrópicamente al estado  $e2$  y el ciclo se repite.

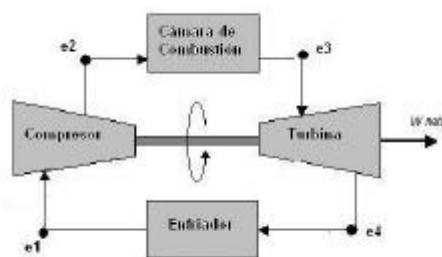


Figura 1: Ciclo Joule Brayton

El análisis de ciclos responde a cuestiones tales como la eficiencia global del sistema, cuánto calor o trabajo es consumido y/o producido, que propiedades del fluido (temperatura, presión, volumen) son requeridos por los componentes o dispositivos, así como entender de qué manera las propiedades de los componentes y del fluido en distintos puntos del ciclo afectan a las propiedades globales del mismo. Distintos diagramas constituyen auxiliares valiosos en el análisis de procesos termodinámicos. En especial, el diagrama de propiedades Temperatura-entropía (T-s) y el diagrama de Exergías.

En Termodinámica, la mayor parte de los dispositivos que producen potencia operan en ciclos. Los ciclos que se efectúan en los dispositivos reales son difíciles de analizar por la presencia de efectos complicados, como la fricción, y la ausencia de tiempo suficiente para establecer las condiciones de equilibrio durante el ciclo. Para hacer factible el estudio analítico de un ciclo, es necesario conservar las complejidades en un nivel manejable y utilizar algunas idealizaciones (modelado). Cuando al ciclo se le eliminan todas las irreversibilidades y complejidades internas, se finaliza con un ciclo que se asemeja al ciclo real pero conformado por completo por procesos internamente reversibles. Un ciclo de estas características recibe el nombre de ciclo ideal. Un modelo idealizado simplemente permite a los ingenieros estudiar los efectos de los principales parámetros que gobiernan el ciclo, sin detenerse en los detalles. No siempre las conclusiones del análisis de ciclos ideales son aplicables a los ciclos reales.

Termodinámica es una materia importante en la formación de un futuro ingeniero. En su currícula, los ciclos termodinámicos constituyen un tema interesante, dado su carácter integrador de principios y por sus posibilidades de aplicación en la práctica. Su entendimiento requiere un amplio y profundo conocimiento de los principios físicos que fundamentan la materia. De hecho los libros más introductorios a la Termodinámica dedican diferentes capítulos al análisis de ciclos y hasta algunos libros se dedican únicamente al análisis de ciclos.

Una variedad de problemas aparecen cuando se enseña a los estudiantes como diseñar y analizar ciclos [4]: (1) los estudiantes tienden a retrasarse en el mecanismo de resolver ecuaciones y cálculos rutinarios. Esto impide explorar múltiples alternativas de diseño y otros estudios, por ejemplo: ver como la eficiencia varía como función de la eficiencia de la turbina versus como ésta varía como una función de la temperatura de salida de la caldera. De modo que sin hacer este estudio comparativo algunas oportunidades de aprendizaje lamentablemente se pierden. (2) los estudiantes están preocupados respecto a qué suposiciones para el modelado necesitan hacer, tal como asumir que un intercambiador opera isobáricamente, o que una válvula lo hace isoentálpicamente, (3) los estudiantes frecuentemente no cambian los parámetros que eligieron para ver si sus diseños son físicamente posibles, por ejemplo: que sus diseños no requieran el absurdo de una bomba que produzca en lugar de consumir trabajo. (4) Si un diseño no es factible, dado el costo de tiempo y esfuerzo que requiere cambiar parámetros y recalcular valores, éstos no se modifican para hacer el diseño factible.

### 3 PROPUESTA

Para contribuir a enriquecer el proceso de enseñanza-aprendizaje, se propone un Sistema Experto (SE) construido específicamente para ayudar a los estudiantes a aprender ingeniería termodinámica. Proveyendo un ambiente de aprendizaje que maneje cálculos rutinarios, facilidades de análisis, ayude a los estudiantes a mantener pistas del modelo de suposición y detecte diseños físicamente imposibles, omisión de datos, inconsistencias o incompatibilidades especificando las causas y/o sugiriendo mejoras correctivas.

El SE diagnosticará la factibilidad de funcionamiento de un ciclo de potencia, el ciclo Joule Brayton

Las tareas propias de un experto que realiza el sistema son, principalmente:

- *Diseño*: en el sentido de que el usuario podrá variar un conjunto de posibles alternativas (las propiedades del fluido, de los dispositivos, de los estados y del ciclo) y el sistema en base a las relaciones de los distintos parámetros involucrados en el diseño de la máquina verificará que estén de acuerdo con determinadas restricciones. Alertará al usuario sobre inconsistencias o contradicciones en datos aportados justificando el porqué de las mismas.
- *Diagnóstico*: en el sentido de que una vez analizado el diseño, el sistema determinará las posibilidades de funcionamiento de la máquina térmica. (encontrar fallas futuras)
- *Depuración, reparación*: en el sentido de recomendar acciones correctivas.
- *Ayudante inteligente*: en el sentido de aconsejar, proporcionar información o efectuar tareas como resolver cálculos rutinarios y realizar distintos análisis termodinámicos.

Antes de comenzar a desarrollar el sistema, se efectuó un análisis de viabilidad a fin de asegurar la conveniencia de resolver el problema a través del empleo de un SE, con resultados satisfactorios.

El desarrollo se llevó adelante empleando fases y etapas de la metodología del área de Ingeniería en Conocimiento denominada I.D.E.A.L [3] (acrónimo de las fases que la conforman: Identificación de la tarea, Desarrollo del prototipo, Ejecución de la construcción del sistema integrado, Actuación para conseguir el mantenimiento perfecto, Lograr una adecuada transferencia tecnológico).

## 4 ADQUISICIÓN DE CONOCIMIENTOS

El proceso de adquisición de conocimientos (AC) comienza con la recolección de información y continúa en paralelo a todas las etapas de construcción del sistema. Esta adquisición en sus dos facetas, extracción de los conocimientos públicos de sus fuentes y educación de los conocimientos privados del experto, se alterna cíclicamente con la etapa de conceptualización (explicada en la próxima sección) para modelizar el comportamiento del experto.

Para tratar de superar el problema de extraer los conocimientos correctos y obtener la cantidad y el tipo adecuado de éstos, se llevó adelante una planificación y control del proceso de AC.

### 4.1. Extracción de Conocimientos

Cuando la fuente de conocimientos se encuentra en forma escrita, el proceso de AC se denomina extracción de conocimientos. La extracción se realizó tanto de fuentes públicas (libros sobre Termodinámica, Internet, principios de la Termodinámica) como de fuentes privadas (apuntes propios del experto, tablas y gráficos, lectura y análisis de ejercicios resueltos por el experto, utilizados en la cátedra de Termodinámica, lectura de diversas publicaciones sobre técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas a dominios de física, en especial física termodinámica, etc.).

### 4.2 Educación de Conocimientos

Cuando los conocimientos se obtienen de los seres humanos, el proceso de AC se denomina educación de conocimientos. Se comenzó esta tarea con un interrogatorio inicial para obtener una visión de alto nivel del dominio y para comprender su alcance, la tarea que realiza el experto y el entorno de la tarea. Posteriormente se llevó a cabo una investigación profunda de forma gradual para obtener los detalles concretos de las distintas áreas del dominio.

Para realizar el trabajo se emplearon distintas técnicas de educación, tanto directas como indirectas:

- *Entrevista Abierta*: donde se le planteó al experto algunas preguntas generales acerca de algún tema en particular de su trabajo. Esta técnica resultó especialmente útil al principio de la etapa de educación para entender la tarea que realiza el experto así como también cada vez que se abordaba algún nuevo punto en su trabajo para lograr una comprensión general del mismo.
- *Entrevista Estructurada*: Esta técnica fue muy útil para ampliar ó profundizar los conocimientos adquiridos con las entrevistas abiertas. Se le planteó al experto una serie de preguntas cerradas y con esto se pudo adquirir conocimientos más específicos y recabar información faltante.
- *Observación de Tareas Habituales*: Se le pidió al experto que resuelva problemas de termodinámica y se observó como lo realizaba. Esta técnica permitió ver que pasos seguía el experto para realizar su tarea y poder distinguir que datos eran importantes y cuales secundarios.
- *Incidentes Críticos*: Se le pidió al experto que comente casos especialmente interesantes o difíciles que se le hayan presentado y que describa cómo los resolvió.
- *Clasificación de Conceptos*: Con los conceptos adquiridos en sesiones anteriores de AC se le pidió al experto que los organice, esto fue útil para entender las relaciones entre los conceptos y además para verificar si faltaban conceptos o si habían algunos que no eran relevantes en el desarrollo de su tarea.

## 5 CONCEPTUALIZACIÓN

La conceptualización consiste en el entendimiento del dominio del problema y la terminología empleada. Se desarrolla en dos etapas. La primera etapa es una actividad de análisis donde se detectan los conocimientos estratégicos, tácticos y factuales. La segunda es un trabajo de síntesis donde los conocimientos detectados en la etapa anterior pasan a formar parte, en mayor o menor medida, de los modelos estático y dinámico, que se integran en el mapa de conocimientos.

El primer paso de la etapa de conceptualización consistió en organizar los conocimientos adquiridos sobre los distintos tipos de máquinas térmicas, su construcción, dispositivos y demás, a fin de identificar conceptos y definir sus propiedades, registrar sus atributos y valores asociados e identificar las relaciones entre conceptos. Se crearon distintos documentos que formaron parte del modelo estático:

- *Glosario de términos* donde se detallo el significado de los términos empleados por el experto
- *Diccionario de conceptos* donde se identificaron los conceptos funcionales de mayor nivel, detallando su utilidad, sinónimos, acrónimos, los atributos que lo definen y la derivación de los datos.
- *Tabla concepto-atributos-valores* en la que se registraron los atributos propios de cada concepto requerido para el modelo de la tarea del experto, detallando para cada atributo el valor o valores correspondientes.

Luego de identificados los conceptos, sus atributos y las relaciones entre ellos, se continuó con el segundo paso, la identificación de los conocimientos estratégicos, tácticos y fácticos.

Los conocimientos estratégicos especifican qué hacer, dónde y porqué hacerlo, es decir, fijan la secuencia de pasos que el SE deberá seguir para ejecutar su tarea. Para ello se identificaron los pasos modulares de alto nivel que el SE ejecutará, el orden y las condiciones en que deberán ejecutarse esos pasos. Luego se dividieron los pasos de alto nivel en tantos subpasos como fue necesario. Finalmente se describió la secuencia de entrada, el modo de razonamiento y las acciones de salida que el SE debe hacer en cada uno de los subpasos del nivel más bajo. En la Figura 2 puede observarse el árbol de descomposición funcional correspondiente a la tarea de determinar la factibilidad de funcionamiento de una máquina térmica.

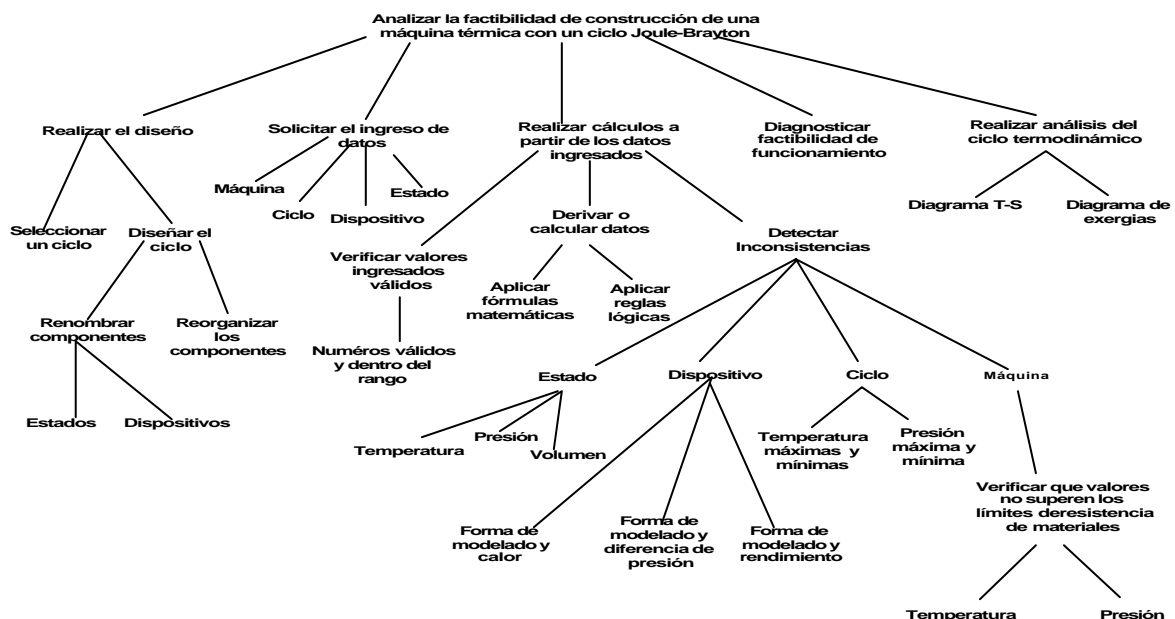


Figura 2: Árbol de descomposición funcional

Continuando con el análisis de los conocimientos se buscaron las inferencias y las incertidumbres que componen los conocimientos tácticos en la creación de un modelo conceptual. Estos conocimientos tácticos del experto especifican cómo el SE puede usar los hechos conocidos e hipótesis del caso para obtener nuevos hechos tanto en situaciones deterministas como en situaciones de incertidumbre. Para ello se analizaron los conocimientos dentro del contexto la tarea que el sistema ejecutará. Con éste análisis se crearon definiciones detalladas de cada paso de razonamiento que deberá ejecutar el SE. Esos pasos son: obtención de conclusiones, reacciones ante nueva información, descripción de la estructura de inferencias y comprobación. Se emplearon seudoreglas para organizar e ilustrar los conocimientos tácticos educidos y tablas para representar cada una de las fórmulas empleadas por el experto para realizar los cálculos necesarios. El SE usará, de un conjunto de fórmulas, las que crea conveniente según los atributos o variables con los que cuente en diferentes circunstancias.

Los conocimientos fácticos del experto contienen información que el sistema conocerá con anterioridad acerca del área de la aplicación, así como información que el sistema obtendrá acerca del caso específico al ejecutar su tarea. Para ello se recopiló y organizó la información acerca de cada atributo general, luego se los clasificó según su importancia para la aplicación y finalmente se buscaron hechos y relaciones entre distintos conceptos independientes de cualquier caso específico.

Finalizada la identificación de los distintos conocimientos se prosiguió con el tercer paso para producir la conceptualización. Se construyó el modelo dinámico o de proceso que lleva a cabo el experto y se comprobó que no hay demasiados errores ni olvidos. Para determinar si un diseño termodinámico es o no factible de llevar a la práctica, el experto realiza los procesos: diseñar la máquina térmica, solicitar datos de las propiedades del ciclo, estados, dispositivos, determinar la factibilidad de la máquina construida y hacer análisis con los datos obtenidos por medio de la construcción de diagramas.

Los modelos estático y dinámico se integran formando el Mapa de Conocimientos. El último paso consistió en la producción del Mapa de Conocimientos que representa el proceso de inferir valores de los atributos. El mismo puede apreciarse en la Figura 3.

## 6 FORMALIZACIÓN

En el proceso de desarrollo de software existen dos tipos de actividad de modelado. La primera tiene como objetivo crear modelos conceptuales, es decir una representación de los conocimientos del experto externa a la computadora. Los cuales se realizaron en la etapa de conceptualización.

La segunda tiene por objeto crear modelos formales, representaciones semi-computables de los conocimientos y conductas del experto. Para que este modelo formal sea operativo necesita de una base de conocimientos, un motor de inferencias y estrategias de control.

Existen diferentes formalismos para representar los conocimientos del experto los cuales se adaptan en mayor o menor medida al sistema a construir. A continuación se describen los formalismos empleados.

### 6.1. Sistema de Producción

Un sistema de producción utiliza las implicaciones como base de su representación y su arquitectura esta formada por tres elementos: Base de Hechos (BH) o memoria de trabajo, Base de Reglas o producciones (BR) y una Estrategia de Control (EC). La BH y la BR forman la base de conocimientos del sistema.

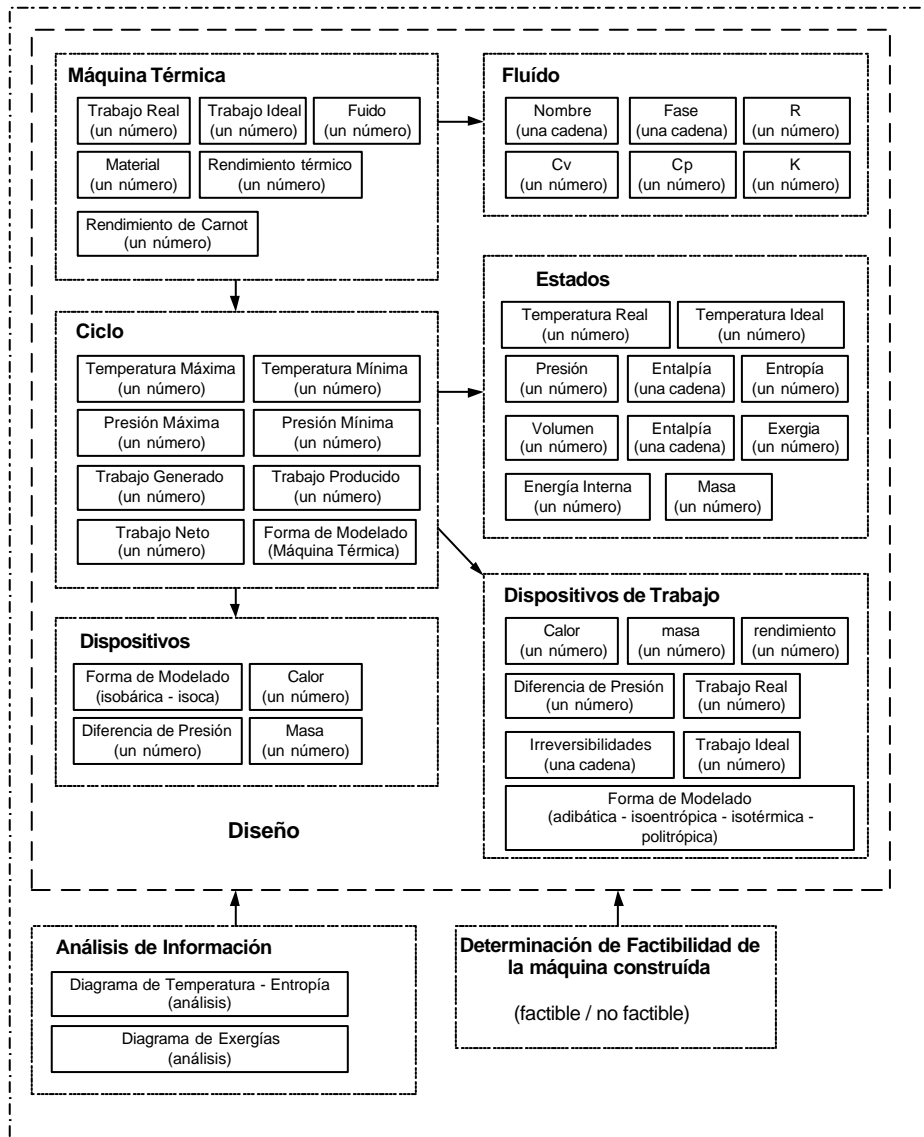


Figura 3: Mapa de Conocimientos

La BH almacena el estado actual del problema, información sobre la tarea y las metas a alcanzar. La BR, formada por un conjunto de reglas, presenta la forma *si condiciones entonces acciones*.

La parte *si*, el antecedente de la regla, representa una lista de cosas a ser verificadas y la parte *entonces*, el consecuente, un conjunto de acciones a realizar sobre la BH. Finalmente, la EC examina la BH y determina la regla que se dispara, encadenando así la regla en unos ciclos de funcionamiento. Cada ejecución de reglas modifica la BH.

Las reglas se construyeron tomando como base el ciclo Joule-Brayton que se muestra en la Figura 1. Algunas propiedades, ya sean del ciclo, del fluido, de los estados del fluido o de los dispositivos, pueden encontrarse en uno de los siguientes estados: el valor de la propiedad no ha sido ingresado o calculado (*N*), ha sido calculado o derivado a partir de otros valores (*C*), fue ingresado por el usuario (*I*). A modo de ejemplo se muestran algunas de las reglas con respecto a la forma de modelado de los dispositivos, en la Figura 4



```

REGLA: "FORMA DE MODELADO ISOENTRÓPICA COMPRESOR"
SI      compresor.formaModelado == "Isoentrópica" y compresor.rendimiento != 1 y
        compresor.rendimientoE != 'N'
ENTONCES
        Mensaje de Inconsistencia="Forma de Modelado Isoentrópica en compresor y
        rendimiento distinto de 1"

REGLA: "FORMA DE MODELADO ADIABÁTICA COMPRESOR"
SI      compresor.formaModelado=="Adiabática" y compresor.calor !=0
ENTONCES
        Mensaje de Inconsistencia="Forma de Modelado Adiabática y Calor distinto de cero"

```

Figura 4: reglas con respecto a la forma de modelado

## 6.2. Marcos

Para los conocimientos del dominio que están organizados en base a conceptos se empleó el formalismo marcos. Los marcos organizan los conocimientos del dominio en árboles construidos por especialización de conceptos generales en conceptos más específicos.

En la Figura 5 se muestran los marcos que representan conceptos, las relaciones que expresan dependencias entre ellos y las propiedades que los describen. Los valores de cada atributo correspondiente a las propiedades de cada marco clase se definieron a través de facetas que expresan de múltiples formas los valores con los que se puede rellenar cada propiedad.

## 7 IMPLEMENTACIÓN

La representación externa de los conocimientos, obtenidos en la conceptualización, es independiente del entorno en el que va a implementarse el SE. La implementación de sistemas basados en conocimiento exige una herramienta de desarrollo que proporcione los formalismos de representación en los cuales puede codificarse la base de conocimientos y los mecanismos de inferencia y control. El problema planteado conduce mayoritariamente a un enfoque basado en reglas. En esta etapa se procedió a construir las reglas necesarias para implementar el motor de reglas lógico.

Las reglas son básicamente de dos tipos, matemáticas y físicas. Las reglas matemáticas se refieren a las fórmulas que se utilizan para resolver el problema, como ser fórmulas que calculen la temperatura real e ideal en cada estado, presión, entalpía, exergía, etc. Las reglas físicas corresponden a distintos controles para que el sistema sea coherente con la realidad, como ser que la temperatura de entrada debe ser menor a la de salida en la cámara de combustión, restricciones de resistencia de los materiales, de forma de modelado, etc.

Se optó por seleccionar una herramienta que aporte el formalismo de reglas y su motor de inferencias asociado. El sistema experto se implementó con el lenguaje de programación Java siguiendo la tecnología orientada a objetos (OO). Para esto se indagó en distintas alternativas de motores de reglas lógicas que fueran compatibles con la programación OO. Entre las alternativas más viables se seleccionó el motor de reglas Drools, el cual compatibiliza con Java.

En la Figura 6 se muestra la interfaz gráfica del sistema. Como puede observarse, la ventana principal cuenta en la parte superior con una barra de menú, donde se encuentran los menús: *Archivo*, *Ciclo* para crear un nuevo ciclo (Joule-Brayton), *Herramienta* para acceder a conversores de unidades para temperatura y presión y *Ayuda*.

En el sector izquierdo de la ventana podemos ver un área de gráficos, donde se muestra, en la primera solapa, el diseño gráfico del ciclo Joule-Brayton. En la segunda solapa, el análisis gráfico de exergías (recuadro ubicado en la esquina inferior derecha de la Figura 6 y en la última solapa el diagrama T-S (esquina superior derecha) que relaciona temperatura y entropía.

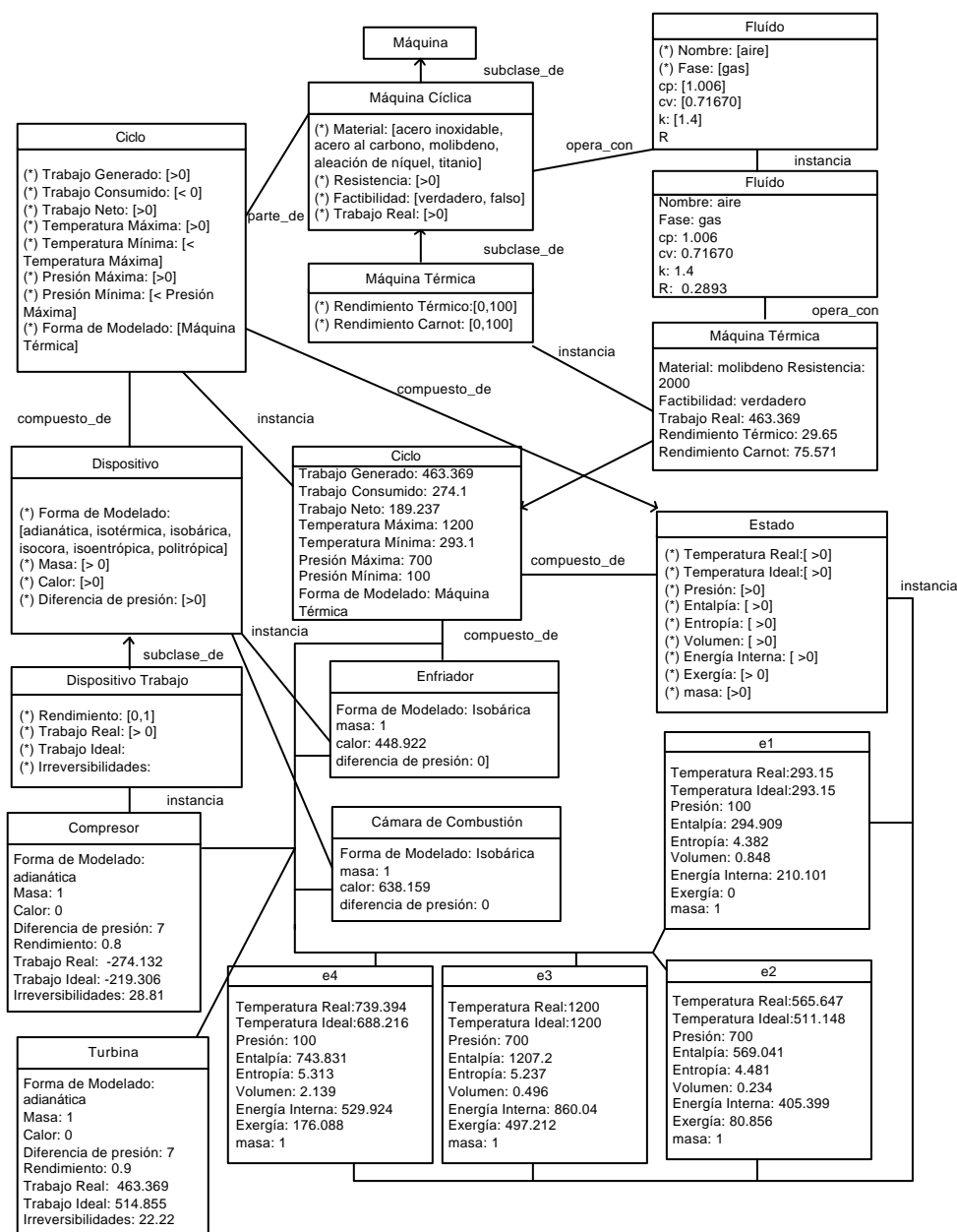


Figura 5: Diagrama de Marcos

A la derecha del área de gráficos se encuentra el panel de propiedades, donde se muestra los valores de las propiedades de estados, dispositivos, ciclos y máquina. Se ingresan valores conocidos relacionados al problema a resolver y se muestran los valores calculados por el sistema. En esta lista de propiedades los colores indican si el valor de la propiedad fue ingresado (verde), calculado por el sistema (azul) o con valor nulo (negro).

En la parte inferior, en la ventana principal, se encuentra el área de mensajes donde se muestran las operaciones que va realizando el sistema. Este panel permite al usuario realizar un seguimiento sobre los valores que las variables van tomando, pudiendo identificar cuales fueron ingresadas, cuales fueron calculadas y también los cálculos que le dieron origen a los resultados. Otra información que se puede analizar en esta sección, son las modificaciones hechas a las propiedades del sistema y los mensajes sobre advertencias, inconsistencias, errores, omisiones y diagnóstico.

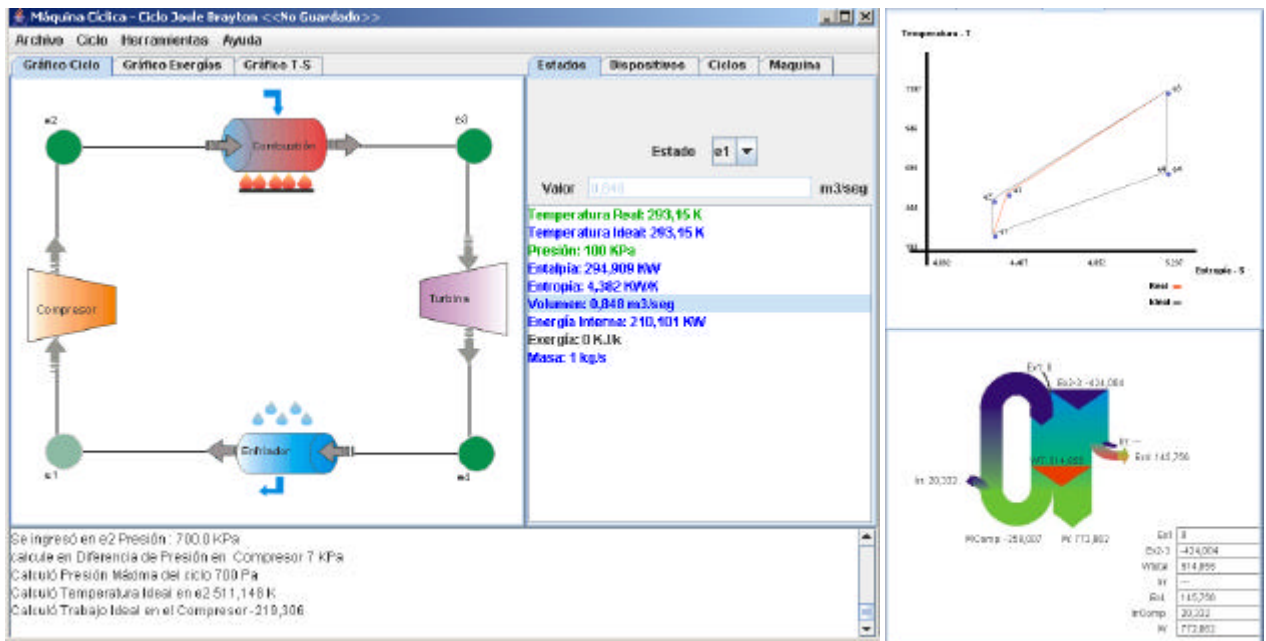


Figura 6: Interfase gráfica del sistema

## 8 EVALUACION

Durante todo el proceso de construcción del sistema se llevó a cabo, en paralelo, una tarea de evaluación en cada fase del proceso de desarrollo. La evaluación engloba dos acciones, proceso de examen y proceso de juicio. Estas dos acciones se realizaron con mayor profundidad en la etapa final de construcción del sistema. Por lo tanto, el primer paso en el proceso final de verificación de un sistema basado en conocimiento se realiza sobre los modelos o parte de los modelos conceptuales, formales y computables. El objetivo de la verificación, en este punto, es determinar si el modelo sigue las reglas sintácticas del paradigma de representación en el que está expresado.

Evaluar la sintaxis del modelo obliga a que la verificación sea realizada, en un principio, por los mismos desarrolladores. Para llevar adelante esta tarea se recolectaron más de diez casos de prueba, problemas de termodinámica con sus respectivos resultados, se los ingresó en el prototipo y se contrastó los resultados obtenidos por el sistema con los problemas resueltos. Esta evaluación ayudó a detectar fallas e inconsistencias tanto en reglas matemáticas como físicas, fallas en la estructura del sistema y la coordinación entre los distintos elementos.

En la evaluación de la usabilidad del sistema, el evaluador debe ser el propio usuario, dado que la usabilidad es un criterio subjetivo. Se consideraron dos tipos de usuarios: el experto y el que tiene algunos conocimientos de termodinámica. Para poder llevar adelante de forma correcta la evaluación se planificó un escenario, una proyección de las tareas de prueba que van a realizarse. Esta planificación sirve para parametrizar el estudio.

Se decidió que el propio experto sea el primer evaluador ya que posee amplios conocimientos en el área y conoce las limitaciones del prototipo y la estructura del sistema.

El resultado de aplicar los test realizados al experto fue la redistribución de algunas propiedades, por ejemplo la temperatura y presión ambiente pasaron de estar en el panel ciclo al panel de máquina. También se corrigieron las unidades en la que están expresados algunos valores y el texto de algunos mensajes de error e inconsistencias, entre otros.

Para hacer más exacta la evaluación de usabilidad se eligió como usuario representativo a un estudiante avanzado en la carrera de ingeniería electromecánica. Luego de aplicar el test a este nuevo usuario, como resultado surgió el cambio del texto de algunos mensajes, sobre todo de

inconsistencia, de manera que sean más descriptivos y aporten información más específica sobre el problema al cuál se refieren. Así como también la redistribución de ítems en el menú.

## 9 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El presente trabajo constituye un aporte original al proceso de enseñanza-aprendizaje de ciclos termodinámicos. Sistematiza y documenta los conocimientos expertos requeridos para determinar la factibilidad de funcionamiento de una máquina térmica, a través del análisis del diseño de un ciclo de potencia, el ciclo Joule Brayton. Aplica un marco metodológico, a través de la metodología IDEAL, asegurando el desarrollo y posterior crecimiento del Sistema Experto.

En las primeras etapas de testeo, se pudo comprobar que los tiempos de cálculo, de análisis de factibilidad de funcionamiento y de modificación y recálculo de los problemas termodinámicos planteados eran considerablemente inferiores al consumido para la resolución manual. Por lo tanto esto permitirá a los estudiantes enfocarse en los conceptos termodinámicos y optimizar el rendimiento de sus diseños, como se proponía en los objetivos del trabajo.

A futuro, se pretende extender la funcionalidad del sistema de modo que abarque diferentes diseños de ciclos como ser, ciclos abiertos, ciclos Otto, Diesel, Rankine y diseños creados por el usuario, así como también que opere con diferentes tipos de fluidos y trabaje con otras máquinas como bombas de calor y máquinas frigoríficas.

En lo referente a aprendizaje, se espera continuar empleando el sistema en las clases prácticas de la cátedra Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Pampa con un grupo “piloto” de alumnos y como estrategia de enseñanza.

## REFERENCIAS

- [1] Cengel Y. y Boles M. *Termodinámica*, Mc Graw Hill, quinta edición, 2006.
- [2] Forbus, D.; Whalley, P. Using qualitative physics to build articulate software for thermodynamics education. *Proceeding of IAAA-94*. Pág.1175-1182. 1994.
- [3] Gómez A., Juristo N., Montes C. y Pazos J. *Ingeniería del Conocimiento*. Editorial Centros de Estudios Ramón Areces. 1997.
- [4] Gago L., Stark N. Experiencia de Aplicación de las TIC's, en la Enseñanza de las Ciencias, mediante el uso de Sistemas Expertos. *Libro de trabajos del I Congreso en Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC's) en la Enseñanza de las Ciencias*. Pág. 170 a 179. 2005.
- [5] Sierra, E., Hossian, A. y García-Martínez, R. 2003. Sistemas Expertos que Recomiendan Estrategias de Instrucción. Un Modelo para su Desarrollo. *Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa*. 1(1): 19-30. 2003.
- [6] Sierra, E., Hossian, A., García-Martínez, R. y Marino, P.2005. Sistema Experto para Control Inteligente de las Variables Ambientales de un Edificio Energéticamente Eficiente. *Proceedings de la XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*. Universidad Nacional de Río Cuarto. Pág. 446-452.
- [7] Bermejo, F., Britos, P., Rossi, B y García Martínez, R. 2002. Sistema de Asistencia para la Configuración de Ventiladores OAF en Neonatología. *Revista del Instituto Tecnológico de Buenos Aires*. 28: 24-68. 2002.