



Biblioteca
Campus Ciudad de México

TECNOLOGICO DE MONTERREY®

Campus Ciudad de México

Escuela de Graduados en Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Ciencias de la Computación

*“Sistema Tutor Inteligente con Simulaciones para el
Entrenamiento de Operadores Novatos de una Planta Eléctrica
de Ciclo Combinado”*

Autor:

Ing. E. Daniel Blancas Reyes

Asesores:

Dra. Juana Julieta Noguez Monroy

Dr. Luis Jaime Neri Vitela

Abril 2012

Resumen

La operación de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC) es compleja, debido a que su funcionamiento considera una gran cantidad de variables y conceptos físicos. Muchas veces el personal que llega a laborar no tiene el conocimiento y la experiencia necesaria para operar una CTCC, por lo que es necesario que aprendan los conceptos básicos asociados al funcionamiento de la CTCC. Una solución es entrenar a los operadores mediante simulaciones que muestren el proceso de cómo manejar una CTCC. Sin embargo, el simulador sigue siendo sólo una herramienta más que ayuda al entrenamiento de los operadores, y no aclara las dudas que surjan al momento de utilizarlo. Un Sistema Tutor Inteligente (STI) con simulaciones hace que la presencia de un instructor no sea indispensable, a menos que el operador lo requiera o que existan dudas que el STI no pueda aclarar. El STI proporciona retroalimentación personalizada, dependiendo del desempeño que el operador muestre en las simulaciones.

En esta tesis se presenta el diseño, desarrollo y evaluación de un STI con simulaciones para el entrenamiento de operadores novatos de una planta eléctrica de ciclo combinado, que sólo contempla la parte de la generación de energía por medio de vapor. Como primer paso se decidió simplificar el modelo de la planta dividiéndolo en tres circuitos principales (turbina de vapor, domo y deareador) y considerar que la planta se maneja en estado estacionario, es decir, que las variables involucradas en el funcionamiento de la planta no varían con el tiempo. Posteriormente se diseñó la interfaz gráfica para las simulaciones de los tres circuitos, dando como resultado una interfaz con dos partes, la primera corresponde a una representación en 3D de cada uno de los tres circuitos, y la segunda, la división de las variables involucradas en la simulación en variables meta, de restricción, dinámicas y de exploración. Estas variables sirvieron de base para la construcción de las redes bayesianas, que corresponden al modelo del estudiante del STI, y de las redes de decisión, que forman parte del módulo tutor del STI. De esta manera, el STI con simulaciones es capaz de proponer lecciones de ayuda a los operadores, de acuerdo a su desempeño en el simulador.

Para la evaluación se decidió medir la ganancia de aprendizaje en los usuarios antes y después de usar el STI con simulaciones. Se realizaron pruebas con dos grupos de usuarios: el primero conformado por profesores de diferentes áreas y el segundo grupo conformado por alumnos de licenciatura de la materia "Balance de Energía". La evaluación del primer grupo mostró una distribución de los resultados irregular, debido a que el grupo está conformado por usuarios de diferentes áreas y a que no todos tienen el mismo nivel de conocimientos en el dominio del problema. Aun así se encontraron ganancias de aprendizaje, aunque pequeñas, por parte del grupo de profesores. Por otra parte, el segundo grupo mostró una distribución de resultados más regular y una mayor ganancia de aprendizaje por parte de los alumnos. De esta manera, los resultados confirman que realmente existe una ganancia de aprendizaje después de utilizar la herramienta desarrollada en este trabajo. Adicionalmente, los comentarios vertidos por los usuarios sobre los beneficios de *SiEntrenO* fueron en su mayoría positivos.

Índice

1	Introducción	5
1.1	Antecedentes.....	5
1.2	Motivación.....	6
1.3	Propuesta de Solución	7
1.4	Objetivos del Trabajo	8
1.5	Estructura del Documento	8
2	Trabajo Relacionado	10
2.1	Simuladores Existentes para el Entrenamiento de Operadores	10
2.1.1	Ambientes Virtuales Interactivos en 3D para el Entrenamiento de Operaciones Industriales y Mantenimiento de Maquinaria.....	10
2.1.2	Sistema de Simulación de Operaciones para la Práctica de Operaciones de una Planta Eléctrica.....	11
2.1.3	Entrenamiento Virtual en 3D y Asistido por Computadora para el Entrenamiento en la Educación del Sistema Eléctrico	13
2.1.4	Ambiente de Aprendizaje Interactivo basado en Realidad Virtual para Operadores de una Planta Eléctrica	14
2.2	Discusión de los simuladores previos.....	16
2.3	Simuladores para la Central de Ciclo Combinado “Gómez Palacio”	16
2.3.1	Asistente de Operación de Centrales Termoeléctricas con Explicaciones	17
2.3.2	Asistente de Operación de Centrales Termoeléctricas	18
2.3.3	Simulador de Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado.....	19
2.3.4	Discusión de los simuladores anteriores.....	20
3	Marco Teórico	21
3.1	Tutores Inteligentes	21
3.2	Simuladores para el Aprendizaje Activo	26
3.3	Redes Bayesianas y Redes de Decisión.....	28
3.4	Funcionamiento de una Planta de Ciclo Combinado.....	29
4	Integración y Desarrollo del Ambiente Virtual de Aprendizaje “SiEntrenO”	32
4.1	Arquitectura para STI-Simuladores.....	32
4.1.1	Módulo de interfaz (ambiente semi-abierto de aprendizaje).....	34
4.1.2	El simulador.....	35
4.2	Modelo del Dominio.....	35
4.3	Modelos físicos del simulador.....	37
4.3.1	Circuito 1 – Turbina de Vapor.....	39
4.3.2	Conservación de la energía en la turbina de vapor.....	40
4.3.3	Método de solución	42

4.3.4	Circuito 2 – Domo	42
4.3.5	Circuito 3 – Deareador	45
4.4	Modelo del estudiante del sistema tutor inteligente	48
4.4.1	Circuito 1 – Turbina de Vapor.....	48
4.5	Modelo del tutor del sistema tutor inteligente.....	52
4.5.1	Circuito 1 – Turbina de Vapor.....	52
5	Proceso de Evaluación.....	55
5.1	Cuestionario de Usabilidad.....	55
5.2	Pre y Post-Test.....	55
5.3	Pruebas con Profesores.....	56
5.4	Pruebas con Alumnos.....	56
5.5	Reflexión sobre el Proceso de Evaluación	56
6	Resultados y Discusión.....	58
6.1	Cuestionario de Usabilidad.....	58
6.2	Ganancias de Aprendizaje	61
6.2.1	Grupo de Profesores	61
6.2.2	Grupo de Alumnos	62
7	Conclusiones y Trabajo a Futuro.....	65
7.1	Aporte Computacional.....	65
7.2	Trabajo a Futuro	66
8	Agradecimientos	68
	Referencias	69
Apéndice A	Modelado en 3D (Turbina de Vapor).....	72
Apéndice B	Administración de Usuarios.....	76
Apéndice C	Diseño del ambiente web	78
Apéndice D	Manual de usuario (fase de pruebas)	80
Apéndice E	Redes Bayesianas – T.V.	87
Apéndice F	Redes de Decisión – T.V. (Circuito 1).....	91
Apéndice G	Pre y Post-Test (Turbina de Vapor).....	97
Apéndice H	Cuestionario de Usabilidad.....	102

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Comparación de los simuladores anteriores.....	20
Tabla 3.1 Ciclos de un STI con retroalimentación inmediata [11].....	24
Tabla 4.1 Variables correspondientes al Circuito 1 –Turbina de Vapor	41
Tabla 4.2 Variables correspondientes al Circuito 2 –Domo.....	44
Tabla 4.3 Variables correspondientes al Circuito 3 – Deareador	47
Tabla 4.4 Rangos de potencia meta para el circuito 1	49
Tabla 4.5 Tabla de relación probabilística para P1 de la RB de potencia baja	51
Tabla 6.1 Resultados de Pre/Post – Test del grupo de profesores.....	61
Tabla 6.2 Resultados del Pre/Post – Test para el grupo de ITESM CSF	62
Tabla 6.3 Resultados del Pre/Post – Test para el grupo de ITESM CCM.....	63

Lista de Figuras

Figura 2.1 Ambiente virtual para maquinaria de acabado para paneles de madera [5].....	11
Figura 2.2 La configuración del simulador en la Universidad de Energía Eléctrica del Norte de China [3].....	12
Figura 2.3 Sistema virtual de la celda de combustible [6].....	14
Figura 2.4 Ejemplo del entrenamiento del operador [4].....	15
Figura 2.5 Pantalla principal de AsistO mostrando la generación de explicaciones [7].	18
Figura 2.6 Pantalla principal de AsistO v.1.0 [7].....	18
Figura 2.7 Modos de operación del Simulador CTCC [8].	19
Figura 3.1 Componentes de un STI.....	25
Figura 3.2 Pasos para el proceso del aprendizaje activo [15].....	27
Figura 3.3 Ejemplo de una red bayesiana para predecir el desempeño de un estudiante en una prueba [12]	28
Figura 3.4 Sistema simplificado de una Planta de Ciclo Combinado	30
Figura 4.1. Arquitectura de bloques para añadir un tutor inteligente a un simulador virtual [20].	32
Figura 4.2 Arquitectura de SiEntrenO para el ambiente semi-abierto de aprendizaje.	33
Figura 4.3 Principales elementos de la interfaz gráfica del ambiente semi-abierto de aprendizaje	34
Figura 4.4 Diagrama Entidad-Relación del dominio.....	36
Figura 4.5 Diagrama general de la Plata de Vapor.....	37
Figura 4.6 Circuito 1 – Turbina de Vapor	39
Figura 4.7 Circuito 2 – Domo.....	42
Figura 4.8 Circuito 3 – Deareador.....	45
Figura 4.9 Red Bayesiana de potencia baja para el primer circuito	50
Figura 4.10 Red Bayesiana de potencia baja para el primer circuito (con propagación de evidencia).....	51
Figura 4.11 Red de Decisión para potencia alta/baja del primer circuito.....	53
Figura 6.1 Características más importantes para el uso de una herramienta de software	58
Figura 6.2 Gráfica de propiedades de usabilidad para SiEntrenO.....	60
Figura 6.3 Porcentajes para las propiedades de usabilidad	60
Figura 6.4 Gráfica con promedios del grupo de profesores	62
Figura 6.5 Gráfica con promedios para el grupo de ITESM CSF	63
Figura 6.6 Gráfica con promedios para el grupo de ITESM CCM	64

Capítulo 1

1 Introducción

Las tecnologías basadas en sistemas inteligentes, conjuntamente con las teorías del aprendizaje, enriquecen los procesos de investigación educativa en la que los modelos tradicionales pedagógicos se ven modificados por las características innovadoras que surgen en los ambientes virtuales de aprendizaje.

Las aplicaciones de la tecnología de *e-Learning* cubren un amplio espectro de la actividad humana. En el ámbito empresarial, *e-Learning* provee facilidades para optimizar los procesos de aprendizaje de un empleado o empresario que esté en contacto con una aplicación e-Learning. Además, permite generar nuevos modelos de negocio como parte de una necesidad de adaptar su actividad profesional a la nueva economía.

Dentro de los ambientes de *e-Learning* destacan los Sistemas Tutores Inteligentes (STI) y los Sistemas de Asistencia Inteligentes (SAI) los cuales proporcionan ventajas en el aprendizaje del estudiante y en las habilidades operacionales para manejar equipo complejo en plantas industriales. En el caso de operación de equipo, el que el usuario pueda detectar la causa del error y cómo corregirlo, eleva su desempeño como operador de planta. Para brindar ayuda significativa, un asistente inteligente deberá proveer explicaciones del "por qué" del error, así como recomendar acciones pedagógicas apropiadas.

Algunas definiciones importantes son:

Sistema Tutor Inteligente (STI): Es aquel sistema que tiene como objetivo reproducir el comportamiento de un tutor humano que puede adaptarse al ritmo de aprendizaje del alumno [1].

Sistemas de Asistencia Inteligente (SAI): Es un sistema que ayuda a la solución de problemas guiando al usuario durante la operación de equipo complejo [2].

La educación y formación académica en la actualidad se han vuelto más complejas, y la cantidad de información disponible es abrumante. Por lo tanto, la forma y los medios a través de los cuales las personas adquieren el conocimiento están evolucionando y hace necesario disponer de ambientes virtuales de entrenamiento. En particular, la necesidad de entrenar a operadores en el Sector Eléctrico tiene demandas específicas debido a que el equipo real puede dañarse o bien causar daño al operador. Con la ayuda de un STI con simulaciones, que proporcione un ambiente virtual de la Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC) es posible evitar estos riesgos.

1.1 Antecedentes

La diversidad de los simuladores para Plantas Eléctricas es amplia, ya que cada uno de ellos debe adaptarse a necesidades específicas de entrenamiento. Se han identificado desde simuladores para

universidades [3] que son utilizados por alumnos para practicar los procesos de una planta eléctrica, hasta simuladores para capacitar operadores en procedimientos de emergencia [4].

En este sentido, la incorporación de herramientas de *software* apoya el entrenamiento de usuarios y la comprensión de conceptos complejos asociados al funcionamiento una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC). Este es el caso de estudio de la presente tesis.

Conforme la tecnología y las técnicas de desarrollo de *software* evolucionan se observan cada vez más simuladores que integran nuevos métodos de aprendizaje y tecnologías de simulación, los cuales permiten crear ambientes de aprendizaje adaptativos basados en simulaciones lo más parecido a la realidad.

El interés de este trabajo de investigación se ha centrado en el estudio y desarrollo de tutores inteligentes con simulaciones para entrenamiento de operadores de plantas eléctricas de ciclo combinado. Estos tienen como antecedente trabajos previos en las siguientes categorías:

- Ambientes Virtuales para en Entrenamiento
- Simulaciones de Plantas Eléctricas
- Tutores Inteligentes con simulaciones

En la primera categoría se encuentran los ambientes virtuales que ayudan a realizar procesos de mantenimiento, operación o reparación de maquinaria industrial en general [5].

En la segunda, se encuentran simuladores que ayudan al entrenamiento de operadores de Plantas Eléctricas para que aprendan las funciones más importantes de los componentes de una planta y resolver problemas de operación que se puedan llegar a presentar con equipo real [6].

En la última categoría están presentes simuladores que utilizan un Sistema Tutor Inteligente (STI) para dar retroalimentación al usuario, dependiendo de su desempeño. Como ejemplo, se puede mencionar el caso del “Ambiente de Aprendizaje Interactivo basado en Realidad Virtual para Operadores de una Planta Eléctrica” [4] que ayuda a los usuarios a aprender procedimientos operacionales para una planta eléctrica presentándoles una serie de recomendaciones de acuerdo a su desempeño en la simulación.

1.2 Motivación

En muchas ocasiones las reuniones presenciales entre el instructor y el usuario se complican, debido a que las agendas de ambas partes no son del todo compatibles. Adicionalmente, los sistemas y equipos de las plantas eléctricas son caros y generalmente sólo se utilizan para operar la planta y generar energía eléctrica, no para labores de entrenamiento. En este sentido, un Sistema Tutor Inteligente (STI) puede jugar un papel muy importante en el entrenamiento de los operadores. Esto representa las siguientes ventajas: i) los operadores pueden interactuar en cualquier momento y realizar sus sesiones de estudio, ejercicios, simulaciones, etc., ii) los operadores pueden recibir retroalimentación adaptativa y en línea por parte del Tutor Inteligente,

y iii) el instructor (humano) puede revisar en todo momento el avance del operador y brindarle retroalimentación adicional a la proporcionada por el STI.

El desarrollo de los Sistemas Tutores Inteligentes ha evolucionado también rápidamente. Hoy en día presentan muchas ventajas, por ejemplo, no es indispensable la presencia de un tutor humano que proporcione al usuario seguimiento en cada paso del proceso cognitivo. Por estas razones, resulta atractivo diseñar sistemas que integren diferentes tecnologías, combinándolas con técnicas de aprendizaje que ayuden al entrenamiento de usuarios en tareas complejas. El principal reto es la selección adecuada de las tecnologías que brinden ventajas competitivas a los ambientes de entrenamiento para el desarrollo de un sistema, como el que se plantea en este trabajo, preservando los beneficios de cada tecnología.

Por otra parte, a través de la interacción que tiene el usuario con el sistema es posible inferir el estado de conocimiento del usuario sin tener la supervisión de un instructor de tiempo completo. Para ello es de vital importancia contar con un buen diseño de los módulos del sistema tutor inteligente, apoyado en un ambiente de simulación realista.

En el estado del arte se identificó que la Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC) “Gómez Palacio” ya cuenta con diversos sistemas de simulación virtual. Adicionalmente se tienen disponibles los manuales técnicos para la operación y funcionamiento de la planta. Por esta razón en este trabajo de investigación se eligió como caso de estudio la modelación del funcionamiento de la planta de vapor asociada a la planta de gas de esta CTCC.

Finalmente, se estableció como objetivo el desarrollo de un Sistema Tutor Inteligente con Simulaciones para el Entrenamiento de Operadores Novatos de una Planta Eléctrica de Ciclo Combinado, que proporcione un mejor aprendizaje sobre la correcta operación de dicha planta.

1.3 Propuesta de Solución

A partir de lo anterior, se propone crear un STI con simulaciones que permita a los operadores aprender los conceptos físicos que se involucran en el funcionamiento de una CTCC, específicamente en la operación de la turbina de vapor.

Se busca que la interacción del operador con el sistema sea a través de simulaciones adecuadas que reflejen el funcionamiento correcto de la planta. Como un apoyo adicional se plantea proveer lecciones de ayuda al operador, de acuerdo a su desempeño. Es importante que el operador pueda aprender los conceptos necesarios que rigen el funcionamiento de una CTCC.

En este trabajo de investigación se propone el desarrollo de un sistema tutor inteligente con simulaciones para el entrenamiento de operadores novatos de una planta eléctrica de ciclo combinado llamado *SiEntrenO*.

A continuación se describen los objetivos más importantes de este trabajo.

1.4 Objetivos del Trabajo

Diseñar y construir un STI basado en simulaciones que sea capaz de:

- Dar seguimiento a los operadores en su entrenamiento.
- Proporcionar lecturas de ayuda a los usuarios del STI para una mejor comprensión del funcionamiento de la planta.
- Representar gráficamente (3D) los componentes básicos de la Planta de Ciclo Combinado.
- Simular un ambiente de operación de la CTCC (sólo Turbina de Vapor).
- Desarrollar un sistema web que permita el acceso a los operadores (y a otros usuarios) a las simulaciones.
- Inferencia del conocimiento del operador.
- Simulación de los procesos más importantes de la Planta de Ciclo Combinado.
- Simplificación del funcionamiento de la planta.

1.5 Estructura del Documento

En este primer capítulo se han descrito los antecedentes, la motivación, el objetivo y el alcance del proyecto.

En el segundo capítulo se presenta la información relevante sobre el estado del arte del tema de investigación de la tesis en cuestión. Se mostrará la dirección que va tomando las últimas investigaciones acerca del tema de estudio y se analizarán algunos trabajos directamente relacionados con los objetivos de este trabajo.

El tercer capítulo está dedicado al Marco Teórico y se explican los métodos utilizados para el desarrollo del trabajo realizado en esta tesis. Éste capítulo está dividido en cuatro secciones, la primera presenta una breve historia de la evolución de los STI, la segunda parte introduce los simuladores para el aprendizaje activo, en la tercera parte se explica el funcionamiento de los sistemas con incertidumbre, y por último en la cuarta sección se describe el funcionamiento de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC).

En el capítulo cuatro se presenta como se desarrolló e integró el ambiente virtual de aprendizaje *SiEntrenO* (Sistema de Entrenamiento para Operadores), la arquitectura utilizada, los modelos físicos de los circuitos y los modelos del estudiante y del tutor correspondientes para la construcción del STI.

En el quinto capítulo de esta tesis se describe el proceso de evaluación y las herramientas que se utilizaron para llevar a cabo esta fase del trabajo presentado.

El análisis, los resultados y la discusión de los mismos se describen en el capítulo sexto.

Por último, en el capítulo séptimo se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro que se podría realizar para dar continuidad y expandir la herramienta resultante de este trabajo.

Al final de este documento se incluyen los apéndices para complementar la información que se explica a lo largo de esta tesis.

Capítulo 2

2 Trabajo Relacionado

El manejo de sistemas, como plantas eléctricas y maquinaria industrial se ha vuelto cada vez más complejo, por lo que el uso de simuladores provee un método efectivo que se ajusta rápidamente a los procesos de control y manipulación. Sin estos nuevos métodos, el entrenamiento de operadores sería mucho más complicado, ya que se presentarían diversos problemas como riesgo de daño hacia a los equipos y hacia los operadores. Además de que muchas veces el equipo no es suficiente para que todos los operadores puedan practicar, por lo que los simuladores presentan una gran ventaja al desaparecer estos riesgos y al agregar la posibilidad de que el operador pueda entrenar en cualquier momento mediante un simulador.

En la siguiente sección se describirán algunos simuladores existentes que se han implementado con éxito en diferentes ambientes de aprendizaje, también se explicará en la sección 2.3 algunos de los simuladores con los que cuenta actualmente la CTCC “Gómez Palacio”.

2.1 Simuladores Existentes para el Entrenamiento de Operadores

En la actualidad existen diferentes tipos de simuladores para el entrenamiento de operadores en los sectores industrial y eléctrico, todos ellos con características diferentes que ofrecen ventajas y/o desventajas según su uso. En esta sección se revisarán algunos simuladores representativos para identificar sus capacidades, las técnicas de aprendizaje que utilizan, las técnicas de evaluación hacia el usuario, así como otras características importantes.

2.1.1 Ambientes Virtuales Interactivos en 3D para el Entrenamiento de Operaciones Industriales y Mantenimiento de Maquinaria

El trabajo introduce ambientes virtuales en contextos centrados en la operación y mantenimiento de maquinaria industrial. En este trabajo también se presenta el diseño e implementación de una plataforma de software que integra modelado en 3D, animación en 3D, simulación en 3D e interfaces humano-máquina [5].

La arquitectura que proponen estos autores permite una rápida modificación de la animación y reuso de los gráficos, un motor gráfico altamente optimizado, un proceso de animación optimizado por *streaming* (distribución de multimedia a través de la red que se consume al mismo tiempo que se descarga) y visualización a través de internet. Todo esto basado en un sistema modular de aplicaciones, librerías de terceros, librerías de soporte y librerías fundamentales.

En este trabajo se describe el modelo de una planta compleja de producción de carpintería. En la representación virtual de la planta entera se puede apreciar el estado para cada máquina directamente en el ambiente virtual, ver de cerca la maquinaria deseada y poder observar con detalle si la máquina necesita un procedimiento específico. Por ejemplo, si es necesario remplazar alguna pieza dañada el sistema le muestra al usuario paso a paso y mediante animaciones y ayudas textuales, cómo remplazar dicha pieza.

Otra simulación que realizaron estos autores fue un ambiente virtual que ilustra cómo dar mantenimiento a una maquinaria de acabado para paneles de madera (ver Figura 2.1). El éxito de esta aplicación fue tal, que la empresa desarrollo para ese modelo de maquinaria, un completo manual completo de mantenimiento en 3D, el cual fue entregado junto con toda la documentación correspondiente y se distribuyó a los clientes.

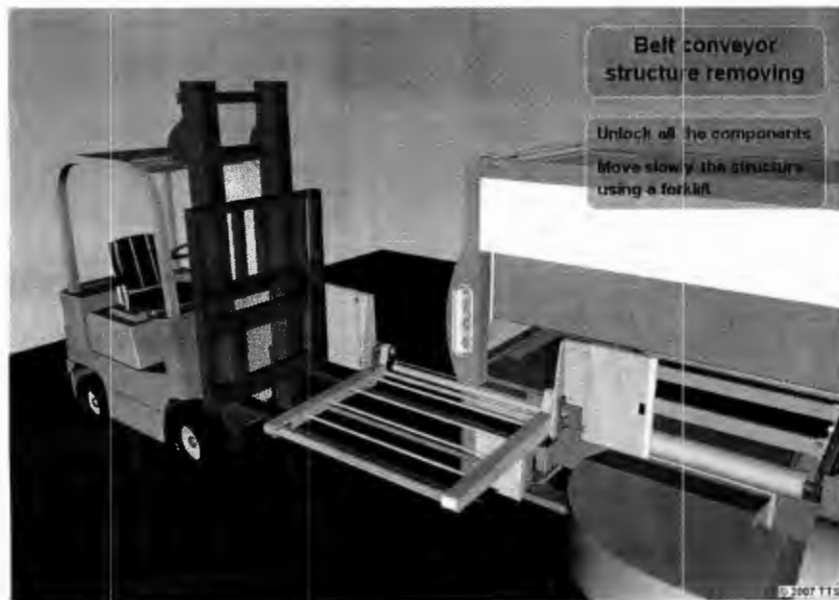


Figura 2.1 Ambiente virtual para maquinaria de acabado para paneles de madera [5].

2.1.2 Sistema de Simulación de Operaciones para la Práctica de Operaciones de una Planta Eléctrica

En este trabajo se describe la integración de un simulador para enseñar la operación de una planta eléctrica en la Universidad de Energía Eléctrica del Norte de China (UEENC). Los estudiantes pueden encender/apagar los dispositivos, ajustar parámetros y tratar con problemas de la planta en el simulador. Todos los pasos para la operación fueron realizados por un profesor y convertidos en video para incluirlos en el sistema de instrucción, el cual es independiente del simulador y puede ser consultado fuera de línea [3].

Antes de poder usar el simulador en la Universidad se enseña a los alumnos el modelo matemático para simular la planta eléctrica.

Algunas de las limitaciones del simulador que han identificado los autores se explican a continuación:

- La operación de una planta eléctrica involucra diferentes tipos de conocimiento (termodinámica, mecánica de fluidos, teoría de control, etcétera), que el alumno debe de analizar e integrar al momento de hacer uso de la simulación, y no todos los alumnos aprenden al mismo ritmo.
- La simulación es un procedimiento dinámico y continuo, es decir, el encendido o apagado de la mayoría de los subsistemas debe de hacerse secuencialmente. Por lo que es imposible para el estudiante aprender a operar la planta en diferentes fases por su cuenta.
- Cuando los estudiantes están ocupados con demasiadas operaciones en la simulación, es difícil para ellos tener una visión general que comprenda toda la planta como un sistema completo. Por lo que es importante para el profesor guiar a los estudiantes para que manejen el problema desde un punto de vista de eficacia general.
- El tiempo de práctica en el simulador es limitado, y por lo tanto puede no ser suficiente para atender adecuadamente a todos los alumnos del curso.

Dependiendo del tema en el que se encuentren los estudiantes, el sistema define que herramienta del simulador se pueden utilizar. Se puede practicar con el sistema para el control de distribución (SCD) fuera de línea, en las estaciones de operación DCS (“Dcs Operation Station”). Para la teoría de los cursos, los alumnos pueden estudiar en una estación local. Pero los temas finales del curso deben de ser estudiados en línea en el simulador, ya que la información correspondiente está montada en la estación de ingeniería. En la Figura 2.2 se presenta la configuración del simulador en la Universidad de Energía Eléctrica del Norte de China.

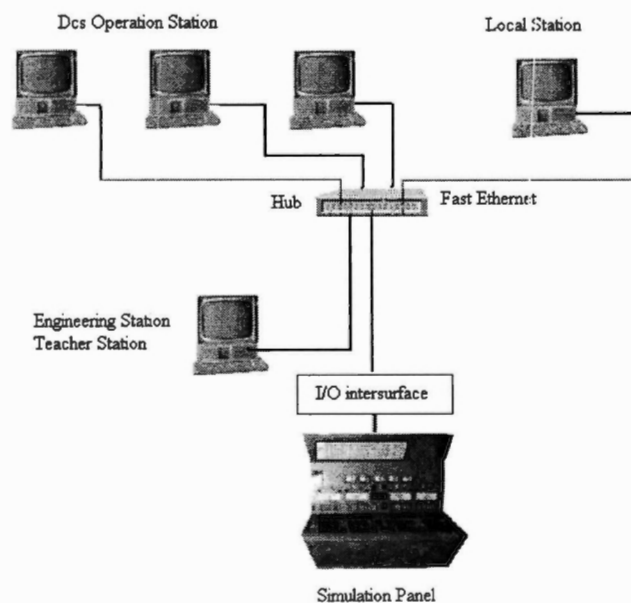


Figura 2.2 La configuración del simulador en la Universidad de Energía Eléctrica del Norte de China [3].

También se cuenta con un sistema de instrucciones para la operación del simulador, el cual sirve para llevar a cabo enseñanza fuera de línea, y así ayudar en el proceso de operación en línea. Dicho sistema contiene lecciones que son necesarias para que el alumno comprenda el funcionamiento de la planta. También contiene videos que muestran a los profesores cómo operar el simulador para diferentes procesos.

Este método de enseñanza, demostración fuera de línea y operación en línea, hace que el uso de la simulación sea óptimo y que el tiempo de los estudiantes para el estudio sea mayor. Y aunque el tiempo de simulación en línea sea limitado, la posibilidad de que los alumnos puedan instalar en sus propias computadoras aplicaciones de simulación de SCD y el sistema de instrucciones para la operación del simulador, hace que el aprendizaje de los estudiantes no se limite al tiempo de clase (práctica).

2.1.3 Entrenamiento Virtual en 3D y Asistido por Computadora para el Entrenamiento en la Educación del Sistema Eléctrico

En la universidad Otto-von-Guericke (Magdeburg) implementaron [6] diferentes módulos de aprendizaje asistido por computadora para redes eléctricas de poder y fuentes renovables de energía, en el programa de estudios de este curso. Durante el desarrollo de los módulos se hizo distinción entre dos áreas diferentes: enseñanza/entrenamiento e investigación. La principal diferencia entre estas dos áreas es la navegación y las habilidades que se deben incluir en los módulos de enseñanza. Por ejemplo, en los módulos de enseñanza/entrenamiento la navegación se explica paso por paso dentro de la lectura a fin de completar exitosamente el escenario de entrenamiento. En el módulo de investigación, por el otro lado, se permite observar y completar diferentes experimentos, así como navegar con libertad en el material de aprendizaje.

La forma de acceso a los escenarios puede ser vía web, o como una aplicación instalada por separado y ser usada para el entrenamiento en una computadora personal. El diseño y desarrollo del concepto siguió dos estrategias: escenarios de enseñanza, que contienen un amplio rango de herramientas multimedia para apoyar el aprendizaje del estudiante, y el diseño didáctico, el cual cubre el desarrollo de ambientes de aprendizaje desde la idea hasta su evaluación.

El sistema de administración del aprendizaje está dividido en tres diferentes áreas: supervisión/banco de datos, área del tutor y aprendizaje/área del salón. El área de supervisión/banco es el lugar donde los módulos de aprendizaje se almacenan. El área del tutor es donde se puede actualizar el contenido entrenamiento hablado. Y por último, el área aprendizaje/salón es donde se realiza la transmisión y carga de los contenidos de aprendizaje toma lugar.

El objetivo del módulo para entrenamiento es proveer al usuario de información acerca de las funciones más importantes y problemas de un interruptor para el suministro eléctrico. Para ello se proporcionan lecturas de entrenamiento, tanto en inglés como en alemán, que pueden ser realizadas como una demostración o como un entrenamiento interactivo en 3D. Como base para

el diseño del interruptor se utilizó información original del fabricante, con esto se logra la precisión del modelo para que la figura virtual sea lo más parecido a la realidad.

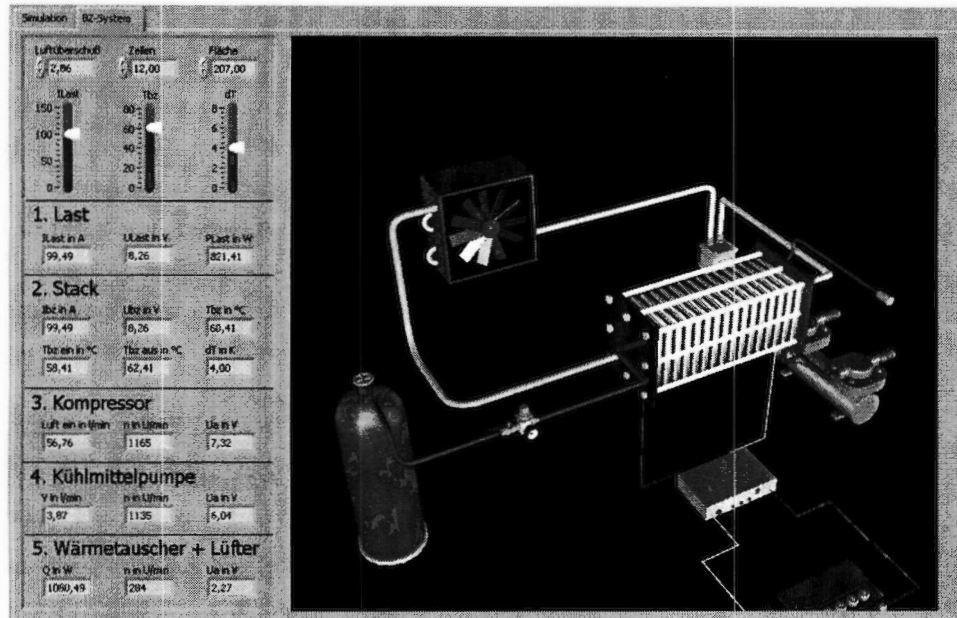


Figura 2.3 Sistema virtual de la celda de combustible [6].

Por otra parte, la principal función del módulo de investigación consiste en la representación de una celda de combustible (ver Figura 2.3), que pudiera mostrar las funciones y problemas de operación. El ambiente permite observar la celda de combustible desde diferentes tipos de vista y realizar diferentes experimentos sin causar daño a la celda de combustible real. De esta forma los usuarios pueden manipular diferentes variables físicas y ser capaces de medir y controlar la función de los diferentes elementos para obtener el máximo de potencia eléctrica. Cuando se presenta algún error, el sistema muestra al usuario instrucciones de como continuar y completar la tarea presentada.

En cuestionarios realizados a los usuarios, estos declararon que fue más fácil el mirar el modelado de los componentes en la pantalla que físicamente, debido a la capacidad de manipular los modelos en 3D y poder mirar componentes dentro del dispositivo que de otra forma es prácticamente imposible. Al igual respondieron positivamente a la pregunta sobre la utilidad de utilizar realidad virtual para aprender conceptos y funciones complicadas, en el área de ingeniería de electricidad y fuentes renovables de energía.

2.1.4 Ambiente de Aprendizaje Interactivo basado en Realidad Virtual para Operadores de una Planta Eléctrica

En este trabajo explican cómo crearon un sistema que incorpora realidad virtual (RV) dentro de un ambiente de aprendizaje interactivo (AAI). EL AAI se compone de un Sistema Tutor Inteligente (STI) y un micro mundo. El sistema de RV basado en un AAI se aplica para el entrenamiento de sub-operadores novatos que no tienen experiencia en el control de una planta

eléctrica, cuyo objetivo es adquirir el conocimiento para actuar en procedimientos de emergencia [4].

El módulo de RV está compuesto a su vez de dos sub-módulos: el primero permite a los estudiantes explorar libremente el ambiente de RV, mostrando la estructura de la planta de energía, y el segundo, llamado sub-módulo de simulación de RV, que permite que los estudiantes adquieran las habilidades necesarias para la operación de la planta.

La publicación describe ejemplos de aplicación del sistema de entrenamiento de operadores durante el proceso de aprendizaje. Estos ejemplos principalmente muestran el proceso de aprendizaje de las preguntas aplicadas en el módulo del STI hacia el sub-módulo de simulación de ambiente de RV. A continuación se describe este proceso, el cual está ilustrado en la Figura 2.4:

1. En el módulo del STI, el estudiante aprende los procedimientos operacionales y el conocimiento relacionado mediante preguntas fundamentales orientadas a la situación actual del cuarto de control de la planta. Si el estudiante tiene errores, el módulo le presenta los conceptos fundamentales relacionados con las preguntas en las que se equivocó.
2. El estudiante pasa al módulo de RV, en donde se le presentan mensajes acerca del conocimiento procedimental básico. Posteriormente, el estudiante simula y pone en práctica dichas habilidades poniendo atención a dichos mensajes.
3. El estudiante simula el procedimiento utilizando el sistema de control virtual de la planta de energía. Al mismo tiempo el ambiente de RV guarda un historial de las operaciones que el estudiante realiza en la simulación.
4. En este último paso, el estudiante puede revisar cuáles fueron sus errores o aciertos en la simulación.

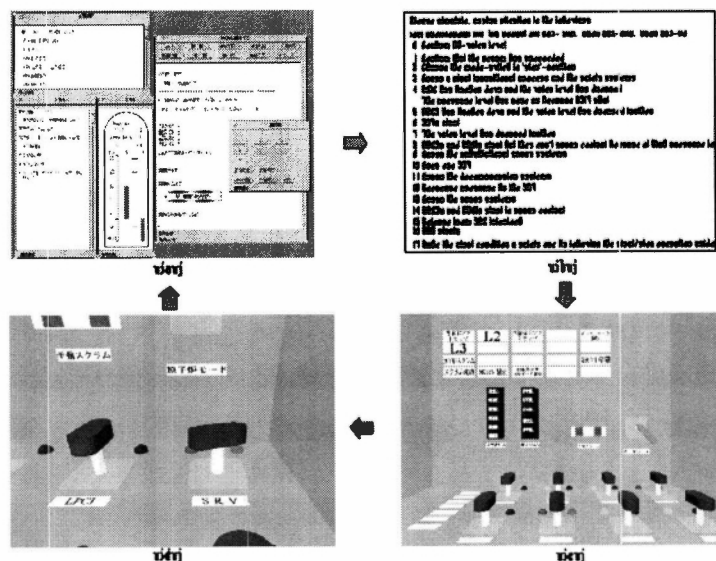


Figura 2.4 Ejemplo del entrenamiento del operador [4].

El sistema de RV basado en AAI ayuda al descubrimiento del aprendizaje con la realidad, por lo que es posible para los estudiantes relacionar las habilidades con el conocimiento y adquirir ambas en el proceso.

2.2 Discusión de los simuladores previos

En la sección anterior se describieron algunas aplicaciones que utilizan como recurso simulaciones. Se revisaron las técnicas de aprendizaje, herramientas, interfaces, IA y características particulares de cada aplicación.

Los ambientes virtuales de aprendizaje para sistemas complejos como plantas eléctricas y maquinarias industriales se han vuelto cada vez más sofisticados [6]. Por otra parte, la oportunidad de que un operador/estudiante pueda entrenar en la planta eléctrica real, es cada vez menor o hasta imposible. Adicionalmente, la demanda de medidas de seguridad se incrementa cada vez más, y el enfoque hacia currículos educativos no es sólo para dar conocimiento sino también para relacionar el conocimiento con las habilidades y adquirir ambas [4]. De acuerdo a un estudio [3] del 20% al 30% de los apagones anormales son directamente causados fallas de algún operador o personal de mantenimiento. Por esta razón, es de vital importancia para el operador ganar confianza y experiencia mediante el uso de simuladores.

El uso de ambientes virtuales interactivos en 3D provee una forma de innovación y evolución en el sistema de educación, entrenamiento, mantenimiento y operaciones de reparación en plantas industriales [5], así como también el proporcionar lecciones de ayuda a los operadores/estudiantes que puedan revisar fuera del ambiente de simulación [3]. El representar los dispositivos modelados en 3D con la mayor precisión, es importante para que el usuario pueda visualizar los componentes lo más parecido a la realidad [6].

El último caso [4] fue de mayor interés en este trabajo, debido a que incorpora el uso de un STI y presenta objetivos similares al trabajo de esta tesis. Sin embargo, en este trabajo el STI asigna un siguiente experimento, cuya dificultad depende del desempeño del operador durante simulaciones anteriores.

2.3 Simuladores para la Central de Ciclo Combinado

“Gómez Palacio”

Actualmente el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) cuenta con tres simuladores para capacitar al personal que opera una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado. Cada uno de estos simuladores tiene diferentes características. Cabe destacar que el simulador desarrollado como caso de estudio de este trabajo, es para operadores novatos, que al terminar su entrenamiento en el ambiente virtual *SiEntrenO*, podrán continuar su preparación con los demás simuladores de esta institución, de acuerdo a su estado de avance de conocimientos y competencias.

El Asistente de Operación de Centrales Termoeléctricas con Explicaciones (llamado AsistO) fue creado como un ambiente de simulación para operadores de un nivel intermedio, ya

que ofrece explicaciones al operador en caso de error al operar la simulación. En el siguiente nivel se encuentra AsistO (sin explicaciones), para operadores de nivel avanzado, debido a que ya no apoya al operador en caso de que cometa algún error. Por último, los operadores pueden acceder al ambiente del Simulador de Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC) el cual ya no presenta una interfaz gráfica, el operador sólo observa las variables de la simulación y gráficas que muestran el cambio de algunas variables respecto al tiempo.

A continuación se explicará cada uno de estos simuladores y sus características principales.

2.3.1 Asistente de Operación de Centrales Termoeléctricas con Explicaciones

El Asistente de Operación de Centrales Termoeléctricas (AsistO) con explicaciones es un agente computacional basado en planificación con incertidumbre que genera recomendaciones de alto nivel para operadores de planta. El asistente funciona en línea durante operación normal o disturbios. En esta aplicación los disturbios serán aquellos cambios de estado ocasionados por fallas en el proceso. Las recomendaciones del agente informarán al personal de operación cuando y como actuar para mantener una operación óptima, como recuperarse de un transitorio, o como minimizar la probabilidad de un accidente (riesgo). El sistema se probará con un simulador para demostrar la medida en que el asistente mejora el desempeño de una planta, mediante la comparación de la operación asistida y no asistida [7].

AsistO puede usarse en modo de visualización de datos de simulación, o en modo de control manual. El primer modo solo permite observar una simulación en particular, previamente elegida en las opciones del simulador CTCC (arranque en frío, planta estabilizada, etcétera). En caso de elegir modo manual es posible manipular dos variables: válvula de alimentación de agua y las válvulas de control de alimentación de vapor; en este caso también se deberá elegir un modo de simulación del simulador CTCC.

Para las explicaciones es necesaria la construcción de plantillas, es decir, si el operador es novato la información es más detallada, mientras que para usuarios avanzados la información se presenta de manera resumida. La explicación aparece cuando el operador realiza una acción diferente a la que AsistO proporciona (ver Figura 2.5).

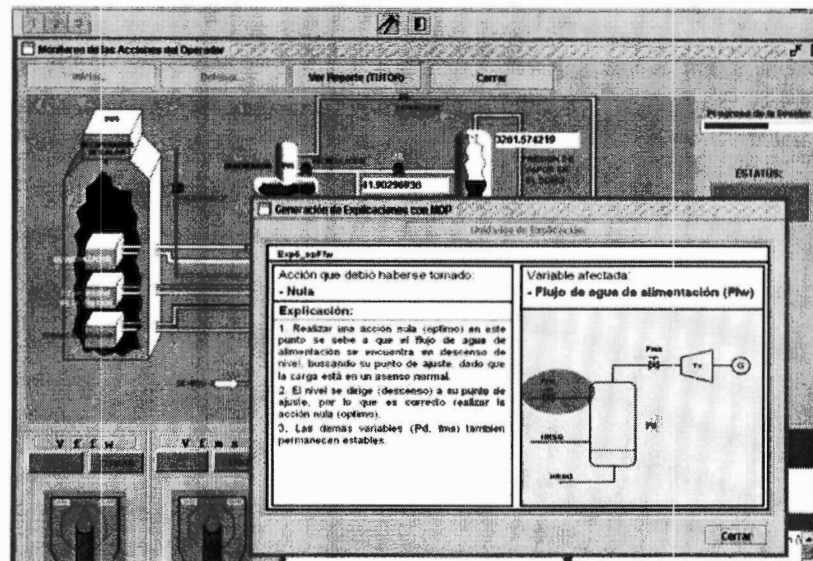


Figura 2.5 Pantalla principal de AsistO mostrando la generación de explicaciones [7].

2.3.2 Asistente de Operación de Centrales Termoeléctricas

AsistO también se puede utilizar sin el módulo de explicaciones (ver Figura 2.6), es decir, al operador no se le presenta ningún tipo de ayuda cuando está manipulando de forma incorrecta las variables correspondientes a la válvula de alimentación de agua y las válvulas de control de alimentación de vapor. Debido a esta diferencia, AsistO con las explicaciones desactivadas está orientado a usuarios de nivel avanzado que ya han pasado por AsistO con explicaciones.

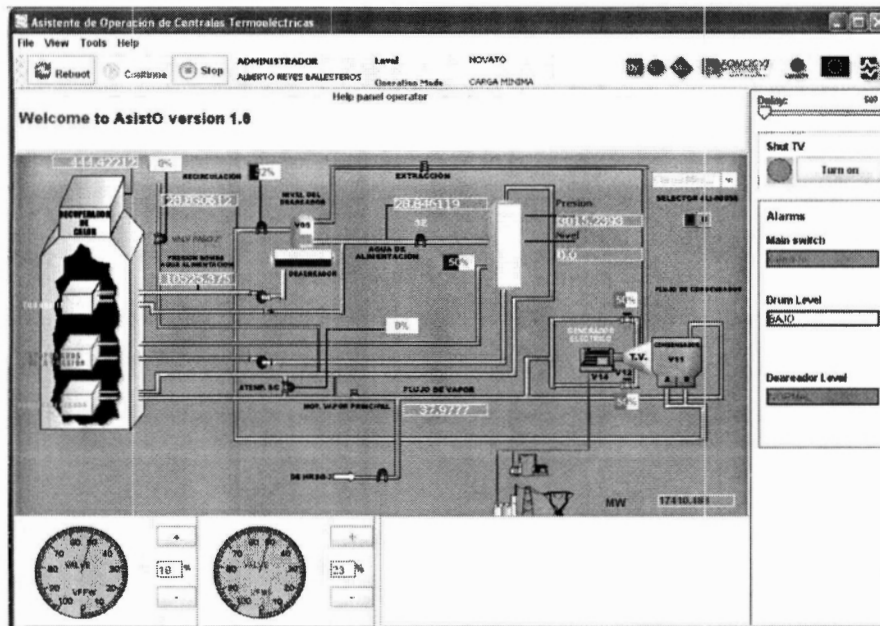


Figura 2.6 Pantalla principal de AsistO v.1.0 [7].

2.3.3 Simulador de Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado

El Simulador de Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC) está orientado al entrenamiento de operadores expertos que conocen a detalle las diferentes variables involucradas en una CTCC y que cuentan con una experiencia mayor, que los operadores que practican en los simuladores anteriormente descritos.

Este simulador como se explicó con anterioridad es la fuente de datos para AsistO, ya que proporciona diferentes casos de simulación de los AsistO hace uso.

Al elegir cualquier modo de operación (automático y semiautomático). En el modo Automático, el SIMCC tiene el control total sobre todas las variables involucradas en la simulación, mientras que en el modo semiautomático AsistO tiene el control sobre algunas de las variables: rechazo de carga, disparo de turbina, flujo de agua de alimentación y las válvulas de vapor 1 y 2 [8].

El simulador cuenta con los siguientes modos de operación (ver Figura 2.7):

- Plana generando
- Planta respaldada
- Planta en frío
- Planta en vacío
- Condición baja velocidad Turbina de Vapor
- Control por temperatura en Turbina de Gas

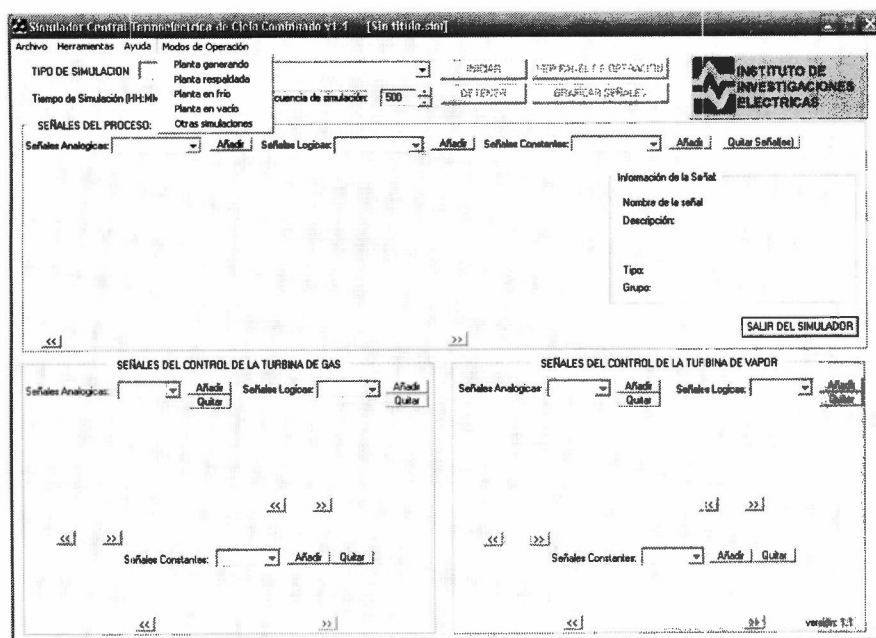


Figura 2.7 Modos de operación del Simulador CTCC [8].

2.3.4 Discusión de los simuladores anteriores

Como ya se vio, la Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado “Gómez Palacio” cuenta con simuladores de diferentes características, dichos simuladores tienen un mayor grado de dificultad en comparación con *SiEntrenO*. Ya que *SiEntrenO* está enfocado a ayudar a que operadores novatos aprendan los conceptos y fenómenos físicos fundamentales que son la base para el funcionamiento de una CTCC (sólo T.V.)

Una vez que los operadores sean capaces de resolver los retos presentados por *SiEntrenO*, y hayan comprendido el funcionamiento, conceptos y fenómenos de una CTCC (sólo T.V.) podrán seguir su entrenamiento en los demás simuladores: *AsistO* con explicaciones, *AsistO* y el Simulador CTCC.

A continuación se presenta una tabla con las características más importantes de cada simulador.

Simulador	Ambiente de aprendizaje	Técnicas de aprendizaje utilizadas	CTCC representada	Nivel de experiencia de los participantes
AsistO (con explicaciones)	Representación en 2D	Modelos de decisión (MDPs), Redes Bayesianas, Plantillas para las explicaciones	T.V.	Intermedio
AsistO	Representación en 2D	Modelos de decisión (MDPs), Redes Bayesianas	T.V.	Avanzado
Simulador CTCC	Sin representación gráfica de la planta	-	CTCC completa (T.V. y T.G.)	Experto

Tabla 2.1 Comparación de los simuladores anteriores.

Capítulo 3

3 Marco Teórico

El objetivo principal del simulador que se describe en este trabajo es la enseñanza de algunos conceptos físicos básicos a operadores novatos de una CTCC, mediante el seguimiento de su interacción con el simulador, y proporcionándole retroalimentación (en forma de lecciones) que pueda ayudar a mejorar su desempeño y habilidades constantemente. Para reconocer el nivel de aprendizaje del operador y poder proporcionarle ayuda adecuada, se planteó la necesidad de contar con un sistema tutor inteligente (STI) que permitiera dar seguimiento y apoyo en este proceso.

A continuación se presenta una breve historia de los sistemas tutores inteligentes y la manera como fueron evolucionando, así como sus características principales. Posteriormente, se describen los simuladores para el aprendizaje activo, ya que con ellos se promueve el aprendizaje y la creatividad de los usuarios mediante diferentes actividades que además de ser visualmente atractivas, se adaptan a los diferentes niveles de conocimiento del usuario. Después se explican las siguientes técnicas de inteligencia artificial utilizadas en la construcción de un sistema tutor inteligente: las Redes Bayesianas y las Redes de Decisión, ya que por medio de la aplicación de dichas técnicas es posible inferir el conocimiento de un usuario, con base en su interacción en el ambiente de aprendizaje y por lo tanto darle una retroalimentación de acuerdo a su desempeño. Por último, se describe el caso de estudio seleccionado: el proceso empleando vapor que realiza una planta de ciclo combinado para la generación de potencia eléctrica.

3.1 Tutores Inteligentes

Las tecnologías basadas en sistemas inteligentes, conjuntamente con las teorías del aprendizaje, enriquecen los procesos de investigación educativa en la que los modelos tradicionales pedagógicos se ven modificados por las características innovadoras que surgen en los ambientes virtuales de aprendizaje [9].

Las aplicaciones de la tecnología de *e-Learning* (aprendizaje electrónico o en línea) cubren actualmente un amplio espectro de la actividad humana. En el ámbito empresarial, el *e-Learning* provee facilidades para optimizar los procesos de aprendizaje de empleados o empresarios sobre la operación y procesos de negocios. Además, permite generar nuevos modelos de negocio como parte de una necesidad de adaptar su actividad profesional a la nueva economía.

Dentro de los ambientes de *e-Learning* destacan los Sistemas Tutores Inteligentes (STI) y los Sistemas de Asistencia Inteligentes (SAI) que, como anteriormente se explicó, proporcionan ventajas en el aprendizaje del estudiante y en las habilidades operacionales para manejar equipo complejo en plantas industriales. En el caso de operación de equipo, el que el usuario pueda detectar que fue lo que causó el error y cómo corregirlo, sin duda elevará su desempeño como

operador de planta previniendo futuros errores. Para brindar ayuda significativa, un asistente inteligente deberá proveer explicaciones del "por qué" del error y recomendar la acción pedagógica más apropiada, dependiendo de la interacción del usuario con el simulador o sistema en línea.

John Self, uno de los autores pioneros en STI, en su artículo "*The defining characteristics of intelligent tutoring systems research: ITSs care, precisely*" [9] identificó cómo el campo de los STI fue evolucionando mediante el uso de conceptos comúnmente usados en artículos en revistas especializadas de los años 1988 y 1998.

STI 88: sistema experto, modelado del estudiante, resolución de problemas, arquitectura, etc.

STI 98: entrenamiento, agentes, modelado del estudiante, entornos de aprendizaje, colaboración, etc.

En ese periodo la construcción de los STI cambió de emplear diseños generales, en ambientes de entrenamiento escolar o universitario, hacia el desarrollo de aplicaciones de nuevas tecnologías y ambientes de aprendizaje.

A continuación se describe brevemente cómo evolucionaron los sistemas de apoyo al aprendizaje basados a computadora desde la década de 1960 hasta convertirse en Sistemas Tutores Inteligentes en los años 1980 [10]:

- Instrucción Basada en Computadora (CBI)
- Instrucción Asistida por Computadora (CAI)
- Instrucción Generativa Asistida por Computadora (GCAI)
- Sistemas Inteligentes Asistidos por Computadora (ICAI)
- Sistemas Tutores Inteligentes (STI)

Instrucción Basada en Computadora (CBI)

Este tipo de sistemas mantenía una posición teórica conductista. La exposición estaba centrada en el profesor, los componentes de enseñanza se almacenaban en estructuras simples y sólo incorporaba algunos principios de enseñanza básicos.

Sus principales limitaciones eran que la enseñanza estaba basada en exposición del material y que muchos de los sistemas requerían del profesor para dar retroalimentación.

Instrucción Asistida por Computadora (CAI)

Utilizaba la tecnología de la computación y la instrucción individualizada para facilitar el proceso de aprendizaje en todos los niveles educativos. Entre sus principales características se encontraban: reducción de costos de entrenamiento, reducción de la necesidad de utilizar equipo peligroso y caro, y que permitía la rápida actualización del material de enseñanza. Algunos de sus problemas eran que no ofrecían enseñanza personalizada acorde al estado de aprendizaje de cada

alumno y al igual que los CBI, muchos sistemas aún requerían del profesor para dar retroalimentación.

Instrucción Generativa Asistida por Computadora (GCAI)

Añaden la posibilidad de generar nuevos problemas a partir de combinaciones diferentes de datos. Entre las principales limitaciones de los GCAI se puede mencionar que estaban limitados sólo a un cierto tipo de prácticas (principalmente en las matemáticas), los ejercicios eran repetitivos y seguían contando con los mismos problemas que los CAI.

Sistemas Inteligentes Asistidos por Computadora (ICAI)

Los ICAI introdujeron varias características importantes a los tutores inteligentes como: la aplicación de conceptos de Inteligencia Artificial (IA) a los procesos de enseñanza y la definición de arquitecturas base para su desarrollo. En 1987 se convierten finalmente en Sistemas Tutores Inteligentes (STI).

Sistemas Tutores Inteligentes (STI)

Entre las principales características de los STI están: el adaptarse al ritmo de aprendizaje del estudiante, proporcionar a los usuarios lecciones o ayudas de aprendizaje, dar seguimiento al desempeño del estudiante y entregar retroalimentación inmediata y más puntual.

A pesar de que los STI difieren en sus dominios, interfaces de usuario, técnicas de inteligencia artificial, bases de conocimiento, etcétera, su comportamiento es muy similar, ya que la mayoría de estas herramientas consisten de una secuencia de actividades que el estudiante debe realizar con ayuda de un sistema. Cada una de estas actividades está compuesta por una serie de pasos que el estudiante debe seguir y resolver de forma correcta¹. Para resolver estos pasos, los estudiantes necesitan aplicar conceptos, reglas, fórmulas, procedimientos, etc., adquiridos previamente. Estos conocimientos aplicados se denominan eventos de aprendizaje, y no pueden ser monitoreados por el STI ya que ocurren en la mente del estudiante [11].

Sin embargo, el poder identificar los pasos que se requieren para resolver una actividad permite a un STI describir la forma en la que un estudiante resuelve los problemas que se le presentan, y de esta forma podrá predecir y simular su comportamiento futuro. Además, el STI puede monitorear el rendimiento del estudiante, adaptando las estrategias pedagógicas a sus necesidades [9].

Por este motivo, el poder lograr especificar la granularidad de las actividades en un STI, para definir los pasos y así poder diferenciarlos de los eventos de aprendizaje, es una tarea que requiere de un análisis y diseño minucioso de los objetivos pedagógicos y del contenido instruccional del sistema. Por ejemplo, si suponemos que en un curso de álgebra de nivel superior se presenta como actividad resolver la ecuación: $\frac{3}{5}x + 15 = 40$, y el objetivo es validar que el

¹ Se considera que un paso es incorrecto si el STI evalúa que no se están alcanzando los objetivos pedagógicos planteados por los instructores y/o diseñadores [11]

estudiante resuelva correctamente la ecuación, el STI únicamente esperaría como respuestas del estudiante: $\frac{3}{5}x = 25$ y $x = 41.67$. Estos dos pasos permitirán que el sistema evalúe los conocimientos del estudiante sin preocuparse por evaluar los eventos de aprendizaje implícitos en el resultado, como son: los conocimientos para despejar una ecuación, factorizar, redondear, etc. Sin embargo, si suponemos que se trata de un curso de álgebra de nivel básico, cuyo objetivo es lograr que los alumnos aprendan a despejar, factorizar y redondear, el STI requerirá validar y evaluar seis pasos: $\frac{3}{5}x = 40 - 15$, $\frac{3}{5}x = 25$, $x = \frac{25}{(3/5)}$, $x = \frac{25(5)}{3}x=25$, $x = 41.66666$, $x = 41.677$. Generalmente, cada paso se asocia a una acción de la interfaz de usuario. Sin embargo, no todas las acciones de la interfaz de usuario son pasos del STI, por ejemplo, las acciones de avance y retroceso, solicitud de ayuda, entre otras [11].

Paso	Descripción
1	El STI presenta una actividad.
2	Por cada acción:
2.a	El STI puede dar una pista.
2.b	El estudiante resuelve un paso.
2.c	El STI proporciona retroalimentación del paso.
3	El estudiante envía la solución de la actividad.

Tabla 3.1 Ciclos de un STI con retroalimentación inmediata [11].

El comportamiento de algunos STI es simple: asignan una actividad al estudiante, obtienen la respuesta, si esta fue correcta, le dan retroalimentación y continúan con otra actividad; pero si la respuesta fue incorrecta, señalan el error del estudiante y le dan otra oportunidad para contestar correctamente la actividad actual. Sin embargo, especificar un conjunto de actividades compuestas por pasos permite dividir las funciones de un STI en dos ciclos (ver Tabla 2.1), que permiten dar un seguimiento más detallado del proceso de aprendizaje del estudiante. Dichos ciclos son [11]:

1. *Ciclo externo*. Se ejecuta sobre las actividades, y su principal objetivo es seleccionar, de forma inteligente, las actividades que ayudarán en el aprendizaje del estudiante.
2. *Ciclo interno*. Se ejecuta sobre los pasos, y es el responsable de organizar y ejecutar la secuencia de pasos apropiada para cada estudiante. El ciclo interno, generalmente, se encarga de la retroalimentación, inmediata o demorada, y de las pistas o ayuda detallada, que puede ser solicitada o no.

A continuación se describen los principales componentes de un Sistema Tutor Inteligente.

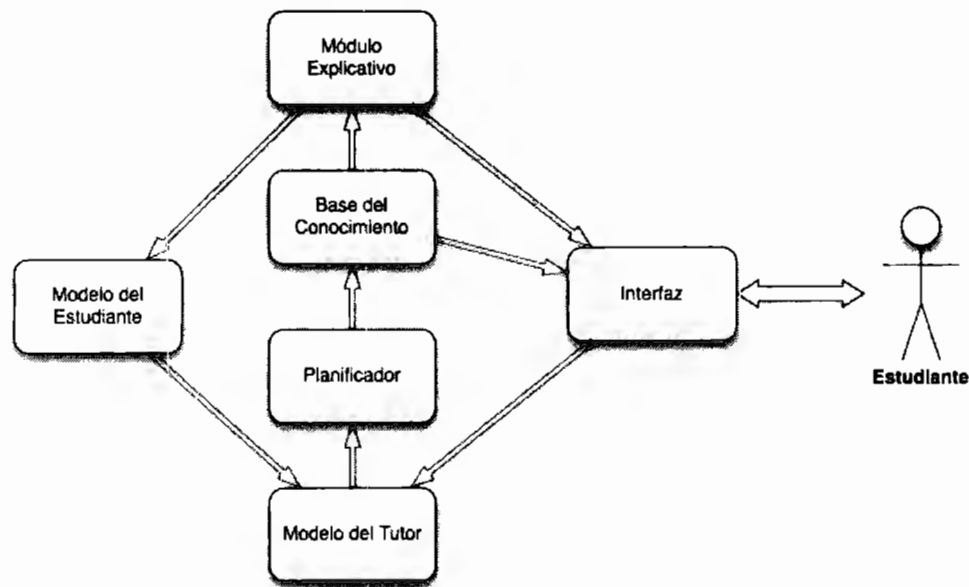


Figura 3.1 Componentes de un STI.

En la Figura 3.1 se muestran los componentes principales que integran a un STI. A continuación se describen algunas de sus características y relaciones.

El *modelo del estudiante* permite evaluar y seleccionar las acciones pedagógicas requeridas para cada estudiante. Contiene el conocimiento sobre el progreso de éste, sus preferencias, historia, errores y estilos de aprendizaje, entre otros. Este modelo se crea y actualiza al recolectar datos de diversas fuentes de forma implícita (observando el comportamiento del estudiante) o explícita (solicitando información directamente al estudiante), por lo que es esencial que el estudiante interactúe constantemente con el STI. El modelo del estudiante representa un reto en el desarrollo de un STI, ya que el conocimiento, las preferencias y el estado del estudiante cambian constantemente a través del tiempo, lo que genera que el modelo sea incompleto e incierto. Esto es un problema de los STI, ya que la incertidumbre puede provocar que la ayuda presentada por el sistema no sea la apropiada, y por lo tanto, no se logren alcanzar los objetivos pedagógicos para los que fue diseñado el sistema. Por este motivo algunos STI utilizan métodos basados en la teoría bayesiana y en la teoría de la decisión para tratar de forma apropiada dicha incertidumbre [12].

El *modelo del tutor* es el responsable del proceso instruccional, ya que crea sesiones de entrenamiento a través de modelos didácticos y objetivos pedagógicos establecidos. Este componente está muy ligado al modelo del estudiante, ya que al combinar los objetivos pedagógicos con el conocimiento sobre el estudiante, se pueden determinar las actividades pedagógicas que se presentarán al estudiante. Por ejemplo, si es necesario presentar explicaciones, si se debe dar retroalimentación, si es necesario que el estudiante realice exámenes, etc.

Un problema en el desarrollo de este componente es poder determinar el momento y la forma en la que el STI intervendrá, ya que un sistema que constantemente asuma el control de la situación podría atraer el desinterés del estudiante; pero por el contrario, un sistema que nunca asuma el control podría generar frustración en el estudiante [10].

En el *módulo planificador* se consideran los pasos de enseñanza que el estudiante debe seguir para alcanzar los objetivos de aprendizaje planteados.

Por último, la *interfaz* de comunicación corresponde a la interfaz de usuario que permite que el estudiante interactúe con el STI. Las interfaces deben de ser sencillas e intuitivas, para no desmotivar a los estudiantes.

3.2 Simuladores para el Aprendizaje Activo

El aprendizaje activo es una estrategia educativa que promueve el desarrollo del pensamiento crítico y creativo del usuario a través de actividades cuidadosamente diseñadas. Para fomentarlo es recomendable contar con gran variedad de ejercicios para adaptarse a los diferentes niveles de conocimiento de los usuarios. Por otro lado, es necesario que los ejercicios o actividades se encuentren dentro de un ambiente visual atractivo e interactivo [13].

El aprendizaje activo es un tipo de aprendizaje que ha adquirido un gran interés en los últimos años. En el aprendizaje activo los usuarios son capaces de tener el control sobre su propio proceso de aprendizaje. En este tipo de aprendizaje, los usuarios necesitan tener acceso a un entorno adecuado que permita que sus esfuerzos se enfoquen en la realización de experimentos que los ayuden a obtener información necesaria para desarrollar el conocimiento.

Para que los usuarios sean capaces de adquirir este tipo de aprendizaje debe hacerse a través de la implicación, participación, motivación, atención y trabajo constante. El usuario no debe comportarse como un agente pasivo sino que debe participar activamente para obtener los conocimientos que se le plantean como objetivos en un curso en particular [14].

En contraste con los simuladores tradicionales (aprendizaje pasivo) en donde la información de entrenamiento es precargada sin ninguna guía por parte del sistema, en los simuladores para el aprendizaje activo el sistema es capaz de seleccionar la información más representativa basada en el modelo de aprendizaje dependiendo de la interacción del usuario con el sistema [15].

Un sistema de aprendizaje activo típico está compuesto principalmente por dos partes: i) un motor de aprendizaje, y ii) el motor de selección de la muestra. El sistema trabaja de manera iterativa, como se muestra en la Figura 3.2. En cada iteración, el motor de aprendizaje actualiza el modelo basándose en el ejercicio actual que realice el usuario. Al mismo tiempo el motor de selección de la muestra elige la información más relevante que se agrega al conjunto de entrenamiento. De esta forma el conjunto de entrenamiento contiene información más relevante para el usuario.

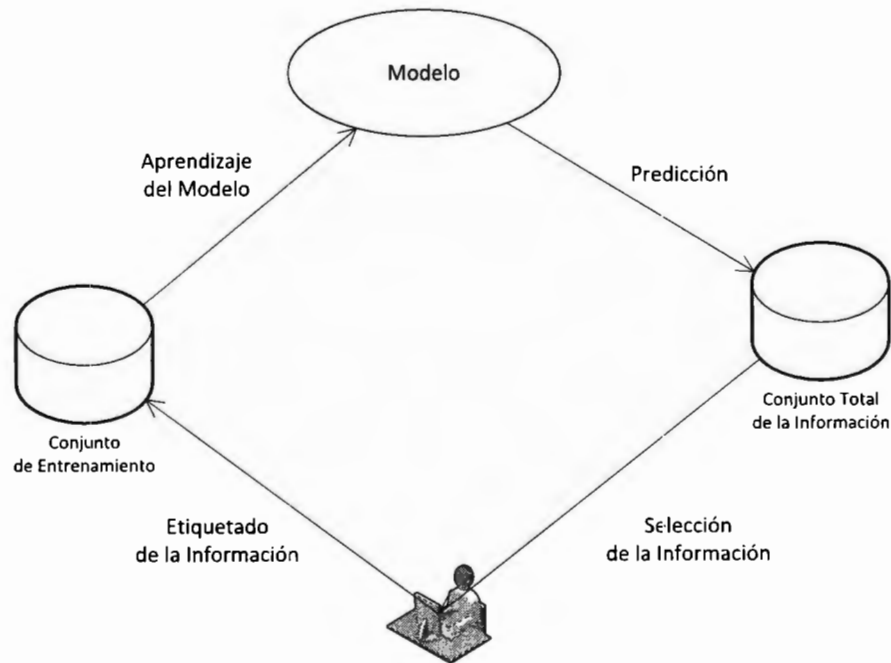


Figura 3.2 Pasos para el proceso del aprendizaje activo [15].

Las simulaciones son herramientas que juegan un papel importante como apoyo para el aprendizaje activo. En las simulaciones el usuario debe resolver problemas practicando y obteniendo resultados de acuerdo al objetivo planteado. De esta manera se estimula al usuario a seguir aprendiendo.

Con el uso de simulaciones, la explicación del material de aprendizaje puede ser dada de una forma abierta y clara, y no solo por medio de texto e imágenes, además de proveer acceso a la educación a los usuarios que por su ubicación geográfica, responsabilidades familiares o problemas de horario no puedan asistir a un modelo de educación tradicional [6].

Durante el proceso de aprendizaje apoyado por simulaciones los usuarios juegan un papel activo. Por lo que las simulaciones no se deben utilizar sólo para visualizar procesos o fenómenos, sino que el usuario debe interactuar con la simulación recogiendo y analizando datos para obtener un mayor beneficio en el aprendizaje [16].

Al trabajar con las simulaciones las posibilidades de aprendizaje del usuario pueden ser limitadas ya que el usuario puede no contar con el tiempo suficiente para analizar la información que el sistema le presenta (de manera visual e interactiva). Ante este hecho se hace necesario que el usuario sea guiado en el procesamiento de la información y así facilitar el aprendizaje. De esta manera el entorno informático que proporciona un simulador para el aprendizaje activo debe de proporcionar retroalimentación al usuario de manera gráfica (multimedia), y adaptarse a sus necesidades cognitivas para que éste pueda aprender de forma efectiva los conceptos o principios complejos.

3.3 Redes Bayesianas y Redes de Decisión

Las *Redes Bayesianas* son estructuras eficientes que permiten representar gráficamente el conjunto de variables probabilistas de la teoría bayesiana. Estas redes combinan información existente con el conocimiento del experto, permitiendo que se modifiquen datos sin alterar la estructura de la red [17]. En un STI, las Redes Bayesianas permiten modelar las relaciones entre las acciones y estados del estudiante, el modelo del dominio, y los resultados.

Los modelos del estudiante basados en la teoría bayesiana se clasifican en tres grupos.

1. *Centrado en expertos.* Requiere que un experto especifique la estructura completa y las probabilidades condicionales del modelo del estudiante. Una desventaja de este enfoque es que se generan muchas variables, lo que impide modificar y evaluar efectiva y eficazmente al modelo.
2. *Centrado en la eficiencia.* Permite especificar parcialmente el modelo del estudiante, lo que genera que el modelo de dominio se ajuste al modelo del estudiante. Un problema con este enfoque es que se pueden introducir hipótesis incorrectas.
3. *Centrado en los datos.* Permite que se infieran la estructura y las probabilidades condicionales a partir de los datos, lo que permite que el tamaño de la red sea más pequeño. Este enfoque permite modelar las relaciones entre las variables observadas, en lugar de intentar modelar los estados ocultos del estudiante.

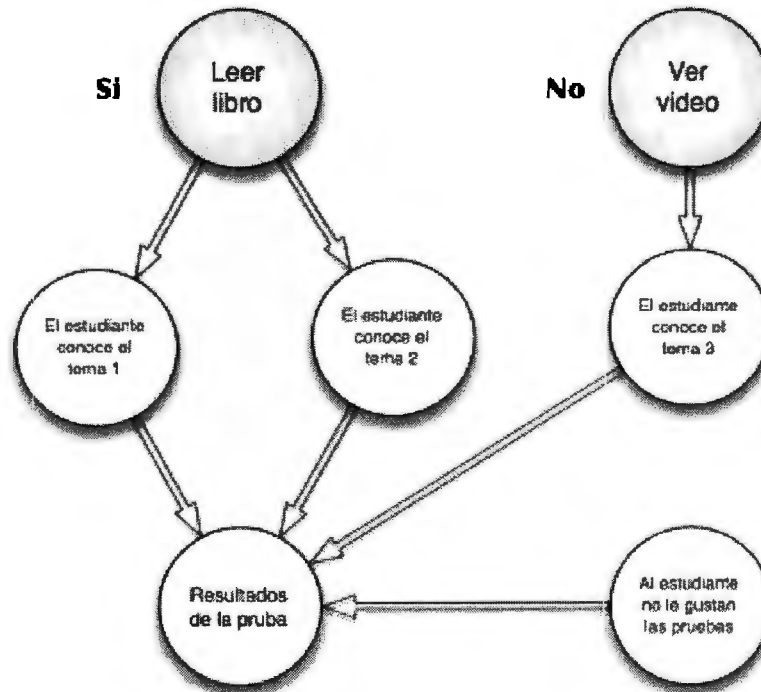


Figura 3.3 Ejemplo de una red bayesiana para predecir el desempeño de un estudiante en una prueba [12].

Las *Redes de Decisión o Diagramas de Influencia* son una extensión de las Redes Bayesianas y combinan la teoría probabilista y la teoría de la decisión para poder tomar una serie de acciones en base a lo que se cree y desea [17]. En un STI, los diagramas de influencia permiten seleccionar acciones pedagógicas y mensajes de error y de retroalimentación apropiados para el estudiante. Los modelos del estudiante que utilizan árboles de decisión se clasifican en tres grupos [12]:

1. *Estrategias alternativas*. Permite utilizar la probabilidad a posteriori calculada por una red bayesiana para poder tomar decisiones en base a reglas.
2. *Estrategias diagnósticas*. Permite escoger acciones pedagógicas que maximizan la utilidad esperada. Esta estrategia se limita a los exámenes de diagnóstico.
3. *Estrategias pedagógicas*. Permite escoger acciones pedagógicas que maximizan la utilidad esperada en base a las actividades y los objetivos pedagógicos del STI.

Además, es importante tomar en cuenta que combinar estas dos técnicas para tratar la incertidumbre puede generar sistemas cuyo comportamiento sea óptimo. Además, se pueden utilizar Redes Bayesianas dinámicas y diagramas de influencia dinámicos para modelar el conocimiento y los estados del estudiante a través del tiempo. Por ejemplo, las Redes Bayesianas dinámicas permitirían generar hipótesis sobre el conocimiento de un estudiante en base a un historial de interacción con el STI, lo que facilitaría su monitoreo y generaría un modelo más adecuado [18].

3.4 Funcionamiento de una Planta de Ciclo Combinado

En esta sección se explica el modelo de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC) que se usó para la construcción del Sistema Tutor Inteligente, objeto de la presente tesis. Es un modelo simplificado que solo cuenta con los componentes básicos de la segunda etapa del proceso (turbina de vapor), ya que este es el único proceso que se simula en el STI. En la realidad hay modelos más complejos de CTCC que pueden involucrar más componentes; sin embargo, en el presente trabajo se utilizó el diagrama simplificado que se muestra en la Figura 3.4.

Una Central de Ciclo Combinado opera en dos etapas:

1. Central de Turbo Gas (Turbina de Gas)
2. Central Termoeléctrica (Turbina de Vapor)

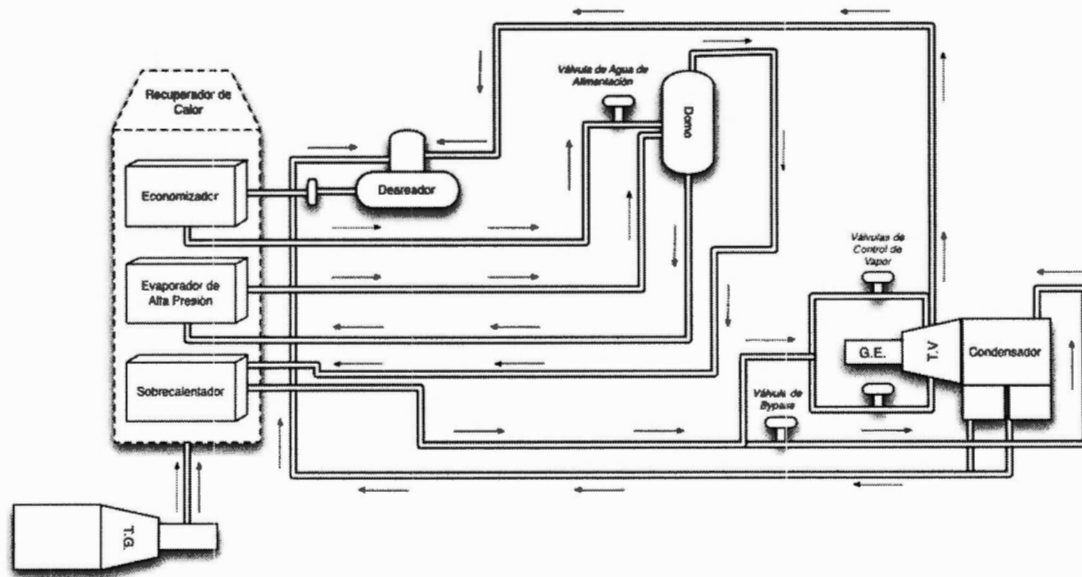


Figura 3.4 Sistema simplificado de una Planta de Ciclo Combinado

En la primera etapa se hacen pasar gases a través de una turbina de gas, los gases que salen de la primera turbina se aprovechan para la segunda etapa (turbina de vapor). Los gases residuales que salen de la turbina de gas se encuentran a una temperatura muy alta, esta energía se aprovecha y los gases se hacen pasar por el recuperador de calor. Un recuperador de calor es capaz de aprovechar la energía de los gases de salida de la turbina de gas para generar vapor por medio de tres contenedores: sobrecalentador, evaporador de alta presión y economizador; siendo este último el contenedor que maneja la menor temperatura.

El sobrecalentador eleva la temperatura del vapor que proviene del domo, denominado vapor sobrecalentado. El flujo de vapor sobrecalentado es controlado por medio de las válvulas de control de vapor, haciendo que solo una fracción del vapor se dirija directamente a la turbina de vapor y haga el trabajo necesario para impulsar las aspas del rotor; mismas que se encuentran acopladas a un sistema de bobinas en el generador eléctrico transformando la energía cinética de la rotación en energía eléctrica.

Un elemento importante en el circuito de vapor es la válvula de seguridad o *bypass*, que sirve para controlar la generación de energía de la turbina de vapor, ya que controla el vapor sobrecalentado que se dirige a la turbina de vapor y lo manda directamente al condensador. Además de ser un mecanismo de seguridad que ante una emergencia (por ejemplo, demasiada presión en las tuberías) canaliza de inmediato todo el vapor producido hacia el condensador.

En el evaporador de alta presión se eleva la temperatura del agua previamente calentada hasta obtener de nuevo vapor, que se retroalimenta al domo, en el cual se produce la separación del vapor mezclado con agua el cual sube hacia el tubo que lo conducirá al sobrecalentador. El domo cuenta con dos salidas, una que alimenta de vapor saturado al sobrecalentador y otra que alimenta de agua caliente al evaporador de alta presión.

Por medio del deaerador se eliminan los gases incondensables del agua que se dirige al economizador; entre ellos el oxígeno, que es altamente corrosivo para las tuberías. Al deaerador también llega el sangrado de la turbina de vapor, vapor sobrecalentado que ayuda al deaerador a retirar los gases incondensables.

El economizador eleva la temperatura del agua, proveniente del deaerador, hasta un punto cercano a la temperatura de ebullición para reponer agua al dorno, flujo que es controlado mediante la válvula de agua de alimentación. Por último se utiliza agua fría para condensar el vapor descargado por la turbina de vapor, el cual se inyecta de nuevo mediante bombas al deaerador para continuar con el ciclo.

Capítulo 4

4 Integración y Desarrollo del Ambiente Virtual de Aprendizaje “SiEntrenO”

Durante el desarrollo del STI *SiEntrenO* se integraron varias técnicas de aprendizaje, tecnologías de la información y conceptos físicos involucrados en una Central Termoeléctrica de ciclo Combinado (CTCC). Dichas tecnologías juegan un papel importante para lograr un ambiente virtual de aprendizaje exitoso. La integración de dichas técnicas nos permite finalmente considerar *SiEntrenO* como un sistema integral que ayuda al entrenamiento de los operadores novatos de una CTCC.

A continuación se hace una descripción mas detallada de cómo se realizó la integración y el desarrollo del ambiente virtual de aprendizaje *SiEntrenO*.

4.1 Arquitectura para STI-Simuladores

En esta sección se describe la arquitectura del ambiente semi-abierto de aprendizaje desarrollado por [19], y que sirvió como base para la elaboración de este proyecto. En la arquitectura se propone que el STI sea un módulo separado de la interfaz gráfica y del simulador. En la Figura 4.1 se muestra un primer esquema a nivel de bloque de la arquitectura genérica, que adicionalmente permite elevar la posibilidad de portabilidad, re-usabilidad y facilidad de mantenimiento del sistema. En este esquema, el operador puede tener una interacción directa con el simulador virtual, permitiendo que el sistema tutor pueda interpretar los mensajes de los eventos ocurridos a partir de la interfaz de usuario y dar forma a los resultados del simulador virtual, a fin de poder brindar retroalimentación a las acciones del operador. El tutor considera incluir sugerencias, preguntas y evaluaciones de ciertos temas en los que el operador podría responder de diferente forma al tutor. Es importante señalar que se lleva un historial de desempeño del operador, que se puede consultar en cualquier momento.

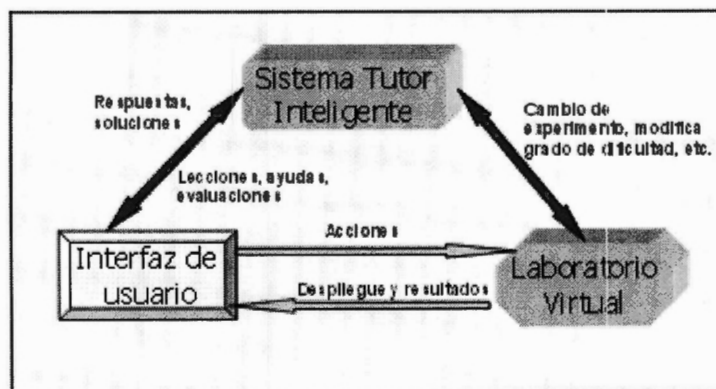


Figura 4.1. Arquitectura de bloques para añadir un tutor inteligente a un simulador virtual [20].

El siguiente nivel de detalle (ver Figura 4.2) de la arquitectura genérica propuesta para combinar sistemas tutores inteligentes y simuladores virtuales basados en simulación, se basa en la arquitectura propuesta por [19], y que considera como punto de partida el diseño de experimentos que permitan mostrar que el uso de un simulador virtual brinde realmente ventajas importantes a los operadores. Adicional a los experimentos disponibles, se debe tener claro el dominio del conocimiento, el tipo de interacción, las ayudas disponibles y la obtención de los resultados [20].

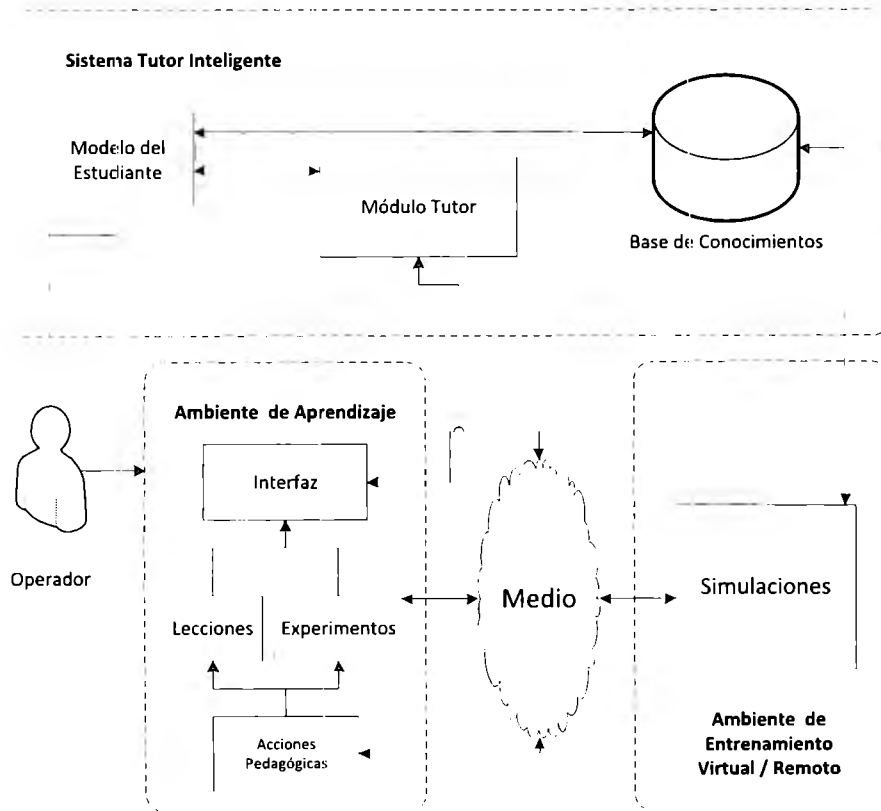


Figura 4.2 Arquitectura de SiEntrenO para el ambiente semi-abierto de aprendizaje.

Antes de que el operador interactúe con el simulador se puede asignar una categoría inicial basada en su historial académico o en un examen rápido. En el caso de *SiEntrenO*, se hace asignando el ejercicio de menor dificultad y dependiendo del desempeño del operador el tutor asigna un problema de mayor, menor o igual dificultad. Cuando el operador realiza un experimento el operador explora los diferentes parámetros de la simulación. Posteriormente, el sistema tutor inteligente analiza su interacción y el comportamiento de exploración y actualiza el modelo del operador. Este modelo envía información al módulo tutor para que éste decida la mejor acción pedagógica, que incluye desplegar ayuda o lecciones, repetir o cambiar experimentos, etcétera, las cuales se envían nuevamente a la interfaz.

4.1.1 Módulo de interfaz (ambiente semi-abierto de aprendizaje)

Para definir los componentes de la interfaz principal se utilizó la metodología definida en [21]. Se consideraron en primer lugar los elementos que permitieran que un operador tuviese oportunidad de explorar los conceptos y visualizar sus efectos en un ambiente simulado. Eso definió el área de mayor tamaño para el simulador y un área más pequeña con parámetros que pudiese explorar. A continuación se incluyó una sección de comandos (botones) y cuatro secciones más que muestran las variables físicas involucradas en la simulación. La interfaz quedó conformada en 6 regiones o áreas de trabajo como se muestran en la Figura 4.3.

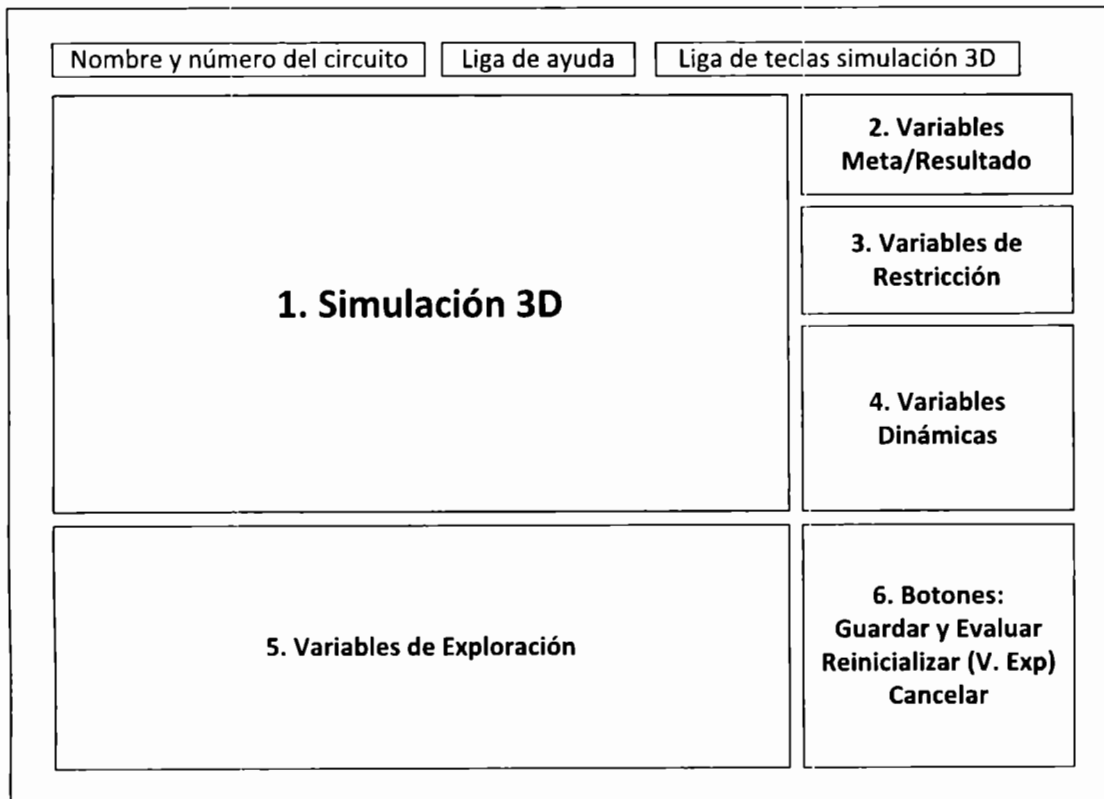


Figura 4.3 Principales elementos de la interfaz gráfica del ambiente semi-abierto de aprendizaje

La simulación en 3D de la CTCC presenta uno de los tres circuitos definidos para la simulación (T.V., domo, deareador). Se consideró que los elementos en 3D permitan visualizar los efectos que tiene la manipulación de las variables de exploración en tiempo real conforme el operador interactúa con la simulación.

La modelación de la planta en 3D se realizó mediante librerías de *JOGL* en lenguaje de programación *Java*. Este proceso de programación se explica a detalle en el Apéndice A.

Las variables meta, son el objetivo que se debe alcanzar para un experimento dado. Las variables de restricción, son aquellas variables que el sistema fija para cada experimento que el operador realiza y sus valores no cambian hasta que el operador no complete el experimento que se le es presentado. Estas variables son cuidadosamente definidas por un experto y permiten que la

solución del problema no se trivialice. Las variables dinámicas son aquellas que se calculan en tiempo real, mediante el valor de las variables de restricción y el valor de las variables de exploración. Por último, las variables de exploración son aquellas que el operador puede manipular (incrementando o disminuyendo su valor), mediante la correcta manipulación de éstas variables el operador podrá alcanzar la meta y completar exitosamente su experimento.

Una vez que el operador este seguro que ha alcanzado la meta y ha seleccionado correctamente el valor de las variables de exploración, podrá guardar su experimento dando clic en el botón de "Guardar y Evaluar", dando paso a que el tutor evalúe y guarde el experimento realizado; proceso que se explicara más a detalle posteriormente. Adicionalmente la interfaz gráfica cuenta con dos botones mas: el primero es "Reinicializar (V. Exp)" cuya función es regresar las variables de exploración a sus valores iniciales, y el segundo botón, "Cerrar" que tal como su nombre lo indica, cierra la pantalla de la simulación sin guardar ningún cambio.

De esta manera las variables meta, de restricción y dinámicas se calculan cada vez que el operador ingrese al experimento. El valor de estas variables lo define el sistema tutor inteligente que se encuentra integrado en *SiEntrenO*, y se hace dependiendo de la interacción y el desempeño que el operador vaya presentando a lo largo de su interacción con el sistema. Si un operador ha tenido un buen desempeño en los experimentos que se le han asignado, es más probable que los ejercicios que se le presenten por el tutor en un futuro sean de mayor dificultad, en contraste, se le presentan experimentos de mediana/baja dificultad a un operador cuyo desempeño ha sido deficiente.

4.1.2 El simulador

El simulador contiene los modelos de simulación del conjunto de experimentos o prácticas que deberán ayudar a que los operadores adquieran los conocimientos de física y habilidades necesarias para operar una CTCC. También incluye el análisis de la interacción del operador con el simulador para la propagación de evidencia basada en el desempeño del experimento y en el comportamiento y exploración del operador. Se consideró que cuando el operador realice un experimento, se obtuviesen los resultados de desempeño y comportamiento de exploración, para propagar esta evidencia hacia el sistema tutor inteligente, con el fin de definir la mejor acción pedagógica, de acuerdo al estado de conocimiento de cada operador. El diseño de este módulo considera brindar facilidades para activar o desactivar los circuitos (turbina de vapor, domo, deareador) si el instructor así lo cree conveniente.

4.2 Modelo del Dominio

Como se mencionó en el capítulo 3, el modelo del dominio contiene la representación del conocimiento, las habilidades y competencias que serán transmitidos por el STI a los estudiantes, permitiendo que se generen problemas (con sus respectivas soluciones), explicaciones y retroalimentación. En la Figura 4.4 se presenta el modelo entidad-relación que contiene las entidades y atributos descriptivos del dominio del sistema tutor inteligente.

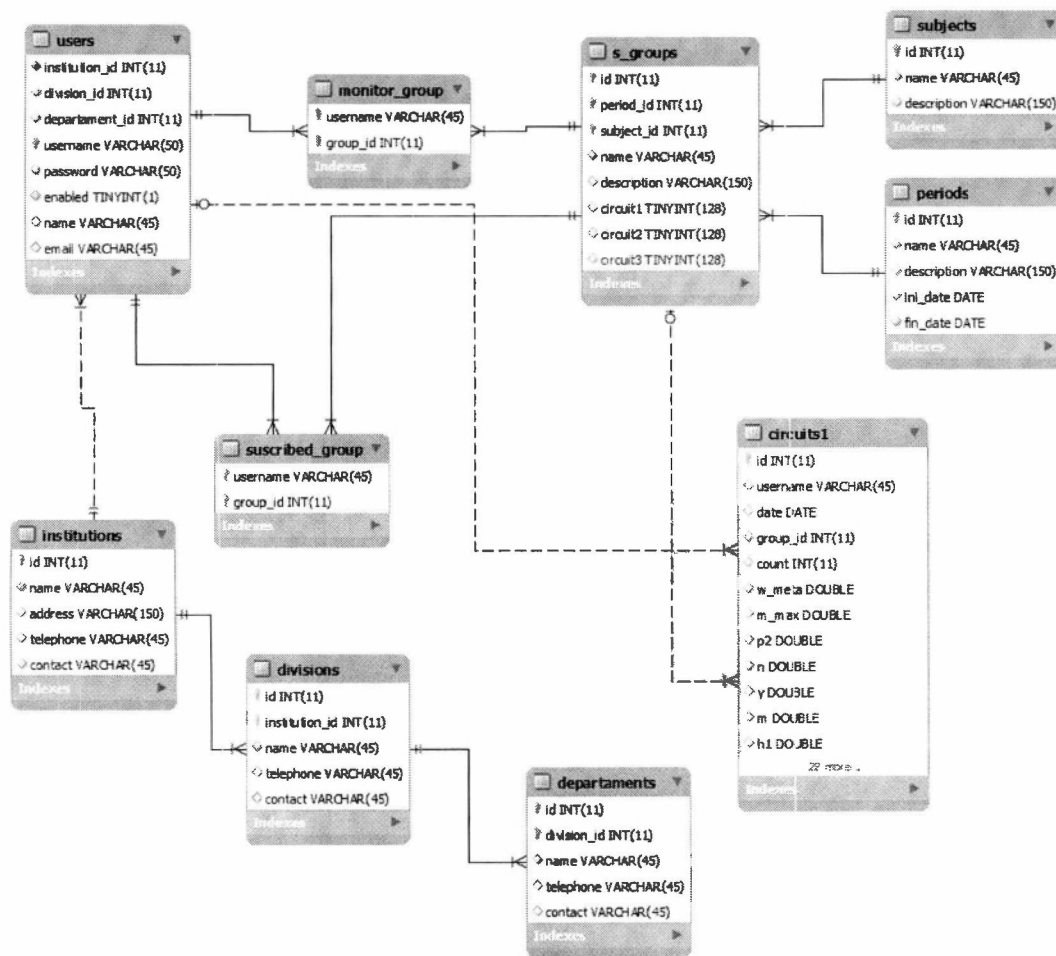


Figura 4.4 Diagrama Entidad-Relación del dominio

En este modelo se ha representado a los usuarios, los cuales pueden ser de 5 tipos. Los usuarios, en caso de ser operadores, se pueden encontrar inscritos a uno o más grupos. En el caso de un instructor, este dirige o es asignado a un grupo. En el Apéndice B se explica con mayor detalle los demás usuarios y sus funciones principales.

Un usuario (de cualquier tipo) debe de pertenecer a una institución y puede o no pertenecer a una división y/o departamento. Es decir, se maneja una estructura en la cual un departamento pertenece a una división, y a su vez la división debe pertenecer a una institución.

Un grupo esta conformado por una materia y un periodo. También contiene información acerca de que circuitos están habilitados para cierto grupo.

Para guardar el avance de cada operador se utiliza una tabla (circuits1) en donde se guarda la información de cada experimento, de las lecciones que el STI asigna al operador e información acerca del siguiente experimento que el operador deberá realizar.

A continuación se describe el modelado físico del simulador.

4.3 Modelos físicos del simulador

Para los propósitos de esta tesis se considerará en todo momento el funcionamiento de la planta de vapor en estado estacionario. Esto es, no se consideran las etapas de arranque de la planta ni su apagado.

Con el fin de estudiar el comportamiento físico del ciclo de la turbina de vapor, se elaboró un diagrama general completo de su funcionamiento, en el que se localizan varios puntos selectos en el circuito (Figura 4.5).

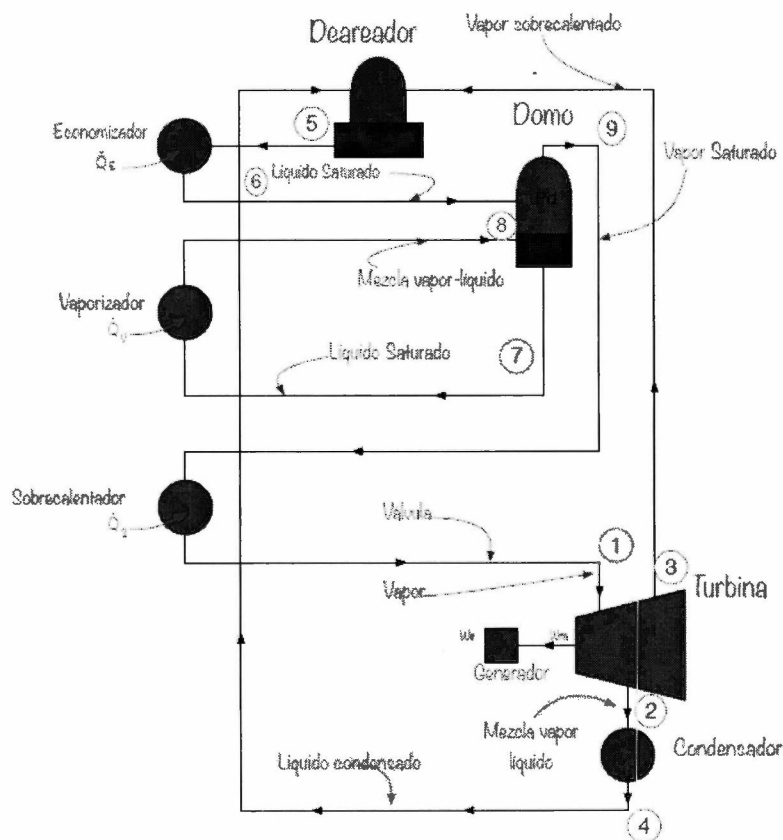


Figura 4.5 Diagrama general de la Planta de Vapor

A continuación se especifican estos puntos:

- (1) Entrada de vapor sobrecalentado a la turbina de vapor, después de pasar a través de las válvulas que controlan el paso de vapor. Por simplicidad, en la figura toma un sólo punto ya que el flujo a través de ambas válvulas es el mismo. Es vapor sobrecalentado.
- (2) A la salida de la turbina de vapor y antes de entrar al condensador. Aquí se tiene una mezcla de vapor agotado y líquido.
- (3) A la salida de la turbina de vapor y hacia el deareador. Es el vapor sobrecalentado de "sangrado".

- (4) A la salida del condensador y hacia el deareador. Es el líquido condensado enfriado.
- (5) A la salida del deareador y hacia el economizador. Es líquido enfriado.
- (6) Líquido saturado que entra al domo proveniente del economizador.
- (7) Líquido saturado que sale del domo hacia el evaporador.
- (8) Mezcla líquido-vapor proveniente del evaporador y que regresa al domo.
- (9) Vapor saturado que sale del domo y se dirige al sobrecalentador.

Las cantidades físicas que se estudian en cada punto son las siguientes:

- p_i , presión en el conducto i . Sus unidades son kilopascales (kPa).
- T_i , temperatura del fluido en el conducto i . Está expresada en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$).
- \dot{m}_i , flujo másico en el conducto i , se define como la masa por unidad de tiempo que pasa por el conducto i . Sus unidades son kg/s .
- $\dot{m}_{m\acute{a}x}$, flujo másico posible en el sistema, se define como la masa por unidad de tiempo máxima que puede circular a través del sistema. Sus unidades son kg/s.
- h_i , entalpía específica. Se define como entalpía por unidad de masa en el conducto i , sus unidades son energía por unidad de masa y se expresan en kilojoules por kilogramo (kJ/kg). La entalpía representa el contenido de calor o energía del fluido.
- s_i , entropía específica. Se define como la entropía por unidad de masa en el conducto i , sus unidades son energía por unidad de masa y se expresan en kilojoules por kilogramo (kJ/kg). La entropía describe el estado de desorden de un sistema termodinámico.
- f_d , es la fracción de apertura de las válvulas de vapor que regulan el flujo de entrada de vapor sobrecalentado a la turbina. Es adimensional, su valor se encuentra en el intervalo $[0,1]$ (o equivalentemente en el intervalo $[0,100]$ %).
- x , es la calidad de la mezcla vapor-líquido. Se define como el cociente entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla. La calidad tiene sentido sólo para mezclas saturadas, esto es, cuando se está realizando un cambio de fase. Su valor está en el intervalo $[0,1]$ (esto es, si se tiene solamente vapor saturado, $x=1$, y cuando se tiene sólo líquido saturado, $x=0$).

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}}$$

$$\text{Donde, } m_{total} = m_{liquido} + m_{vapor}$$

Para simplificar el estudio de las propiedades físicas del sistema, por parte de los operadores, se consideró conveniente aislar tres subsistemas/circuitos del ciclo: el circuito 1 – turbina de vapor, el circuito 2 – domo, el circuito 3 – deareador, los cuales se describen a continuación.

4.3.1 Circuito 1 – Turbina de Vapor

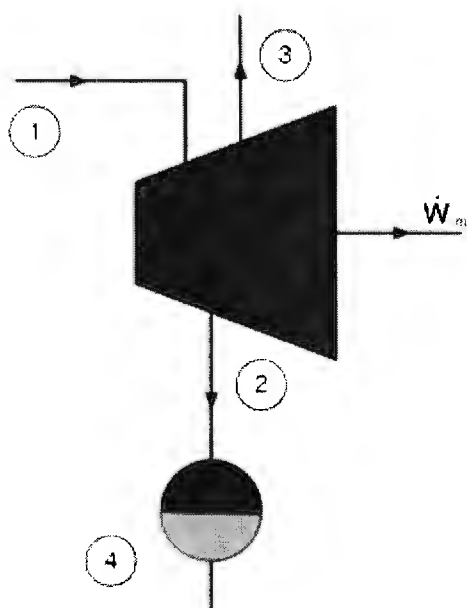


Figura 4.6 Circuito 1 – Turbina de Vapor

El vapor sobrecalentado a alta presión y alta temperatura empuja y hace girar a la turbina convirtiendo su energía térmica en energía mecánica. A su vez, en el generador, la energía mecánica de la turbina se convierte en energía eléctrica que es la que produce la carga de la planta (ver Figura 4.6).

El objetivo de esta sección es que el operador comprenda el rol que juegan ciertas variables de exploración específicas en la generación de una potencia eléctrica dada, tomando en cuenta ciertas variables de restricción.

En el punto (1), el vapor sobrecalentado entra a la turbina. En el punto (2) la mezcla de vapor agotado y líquido se dirige al condensador. El punto (3) corresponde al sangrado, esto es, una cierta fracción de vapor sobrecalentado es dirigida al deareador con el objeto de mantener una presión adecuada en éste. En el condensador la mezcla de vapor agotado y líquido que sale de la turbina se enfría y se condensa. El líquido enfriado se dirige posteriormente al Deareador. El punto (4) se encuentra a la salida del condensador.

Los principios físicos básicos que regulan el comportamiento de todos los componentes del sistema son la conservación de la masa y la conservación de la energía.

4.3.1.1 Conservación de la masa en la turbina de vapor

Se considera que el flujo másico máximo que pudiera circular por el sistema es $\dot{m}_{m\acute{a}x}$, de tal forma que el flujo másico principal en la tubería está dado por

$$\dot{m} = f_v \dot{m}_{m\acute{a}x}$$

donde f_v es la fracción de apertura de las válvulas de control de vapor a la turbina (válvulas de estrangulamiento).

De la conservación de la masa en la turbina se tiene que

$$\dot{m}_1 = \dot{m}, \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

Donde \dot{m}_1 es el flujo de vapor que entra a la turbina, \dot{m}_2 es el flujo de vapor agotado que va al condensador y \dot{m}_3 el flujo de vapor caliente que se dirige al deareador. Aquí, \dot{m} es el flujo principal del circuito.

Por otro lado, si γ es la fracción de vapor que se dirige al deareador (sangrado) en (3), entonces

$$\dot{m}_3 = \gamma \dot{m}_1$$

Por lo tanto

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_3 = (1 - \gamma) \dot{m}_1$$

4.3.2 Conservación de la energía en la turbina de vapor

El proceso de generación de energía en la turbina de vapor se realiza a entropía constante. Por lo que a lo largo de esta sección sólo se maneja como s a la entropía en cualquier punto del circuito 1.

$$s = s_1 = s_2 = s_3$$

Asimismo, al salir de la turbina y antes de llegar al condensador se tiene una mezcla de vapor y líquido con una calidad cercana a 1 (la mayor parte es vapor).

La ecuación para la conservación de la energía está dada por:

$$\dot{Q} = 0$$

$$\therefore \dot{W}_{mec} = \dot{m}_1 \dot{h}_1 - \dot{m}_2 \dot{h}_2 - \dot{m}_3 \dot{h}_3$$

Donde \dot{Q} es el flujo de calor y \dot{W}_{mec} es la potencia mecánica generada por la turbina, donde ambas variables son medidas en megawatts. Por lo tanto:

$$\dot{W}_{mec} = \dot{m} [\dot{h}_1 - (1 - \gamma) \dot{h}_2 - \gamma \dot{h}_3]$$

Ecuación 4.1

Suponiendo que la eficiencia de la turbina de vapor es η , la potencia eléctrica obtenida es:

$$\dot{W}_{elec} = \eta \dot{W}_{mec}$$

Ecuación 4.2

En la Tabla 4.1 se presentan las variables Meta, de Restricción, Dinámicas y de Exploración del sistema, junto con sus unidades y rangos correspondientes.

<i>Variables Meta</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
\dot{W}	Potencia meta o carga demandada a la planta	MW	0 – 100
<i>Variables de Restricción</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
\dot{m}_{max}	Flujo másico máximo	Kg/s	60 – 100
p_2	Presión de la mezcla de vapor-líquido en la posición 2	kPa	5 – 60
η	Eficiencia del Generador Eléctrico	Fracción	0.8 - 0.9
γ	Fracción de vapor de sangrado al deareador (posición 3)	Fracción	0 – 1
<i>Variables Dinámicas</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
\dot{m}	Flujo de masa actual en el circuito	kg/s	*
h_1, h_2, h_3	Entalpía específica en la posición 1, 2 o 3	kJ/kg	*
s	Entropía específica en la posición 1, 2 o 3	kJ/kgK	*
x_2	Calidad mezcla vapor-líquido en la posición 2	Fracción	0 – 1
T_3	Temperatura en la posición 3	°C	*
$error_{rel}$	Error relativo entre la potencia meta y la potencia generada	Fracción	0 – 1
\dot{W}_{mec}	Potencia mecánica de la turbina	MW	0 – 100
\dot{W}_{elec}	Potencia eléctrica real generada por la turbina	MW	0 – 100
<i>Variables de Exploración</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
p_1	Presión del vapor en la turbina en la posición 1	kPa	2,000 - 10,000
T_1	Temperatura en la posición 1		200 – 650
f_v	Fracción de apertura de las válvulas de vapor	Fracción	0 – 1
p_3	Presión del vapor del sangrado en la posición 3	kPa	p_2+50 - $0.9p_1$

* Se calculan automáticamente en la simulación

Tabla 4.1 Variables correspondientes al Circuito 1 –Turbina de Vapor

Por medio de las variables de restricción y de exploración se pueden calcular todas las variables dinámicas. Con estos valores es posible calcular la potencia eléctrica de la turbina de vapor, como se describió antes, \dot{W}_{elec} . El propósito es que el operador obtenga mediante la selección de valores apropiados de las variables un valor para \dot{W}_{elec} muy cercano a la variable meta \dot{W} .

4.3.3 Método de solución

Todos los cálculos de las variables se realizan con el software *freesteam*².

Primero se calcula la entropía y la entalpía en los puntos (1), (2) y (3) de la Figura 4.6.

La entropía s , es calculada por medio de *freesteam* usando como parámetros los valores seleccionados para p_1 y T_1 .

$$s(p_1, T_1)$$

Las entalpías se calculan a partir del valor de s y de los valores correspondientes de presión: p_1 , p_2 , p_3 .

$$h_1(s, p_1), h_2(s, p_2), h_3(s, p_3)$$

Por lo tanto, a partir de los valores dados de f_v y γ se calcula la potencia mecánica a través de la Ecuación 4.1. Finalmente, la potencia eléctrica se calcula a partir de la Ecuación 4.2.

Es importante señalar que la calidad del vapor en el punto (2), x_2 , debe ser mayor o igual a 0.9, si no se corre peligro de dañar la turbina de vapor. Si no se cumple con esta condición el sistema mostrará un mensaje de error al operador para que corrija el valor de x_2 , manipulando las variables de exploración.

4.3.4 Circuito 2 – Domo

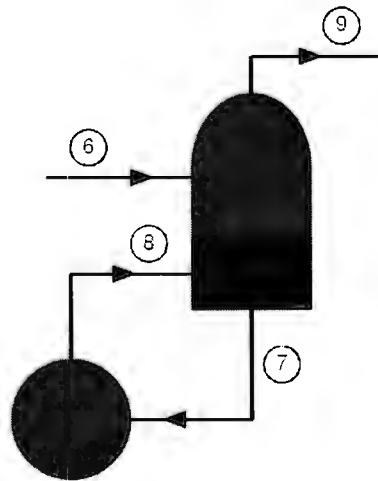


Figura 4.7 Circuito 2 – Domo

² *freesteam* es una implementación código libre del estándar internacional IAPWS-IF97 para tablas de vapor de la Asociación Internacional para las Propiedades del Agua y el Vapor (IAPWS, por sus siglas en inglés). *freesteam* permite calcular las propiedades del agua y el vapor en términos de una variedad de combinaciones de propiedades “conocidas”, y posteriormente *freesteam* resolverá y permitirá conocer los valores de propiedades “desconocidas” del agua y el vapor [26].

Se supondrá que en estado estacionario la presión en el domo es constante, y por lo tanto:

$$p_d = p_6 = p_7 = p_8 = p_9$$

Aplicamos los principios de conservación de la masa y de conservación de la energía, y con base en la Figura 4.7, se puede escribir,

$$\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_9 h_9$$

donde \dot{m}_7 es el flujo másico que se recircula hacia el evaporador. Como la cantidad de líquido que entra al evaporador es la misma que la cantidad de vapor que sale de él, en estado estacionario, se tiene que:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$$

Por otra parte, la cantidad de líquido saturado que entra al domo debe convertirse en vapor saturado al salir de éste, por lo tanto:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_9 = \dot{m}$$

Luego,

$$\dot{m} h_6 + \dot{m}_7 h_8 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m} h_9$$

Para el evaporador, la conservación de la energía es:

$$\begin{aligned} \dot{m}_7 h_7 + \dot{Q}_{evap} &= \dot{m}_8 h_8 \\ \therefore \dot{Q}_{evap} &= \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_7 (h_8 - h_7) \end{aligned}$$

Ecuación 4.3

La Tabla 4.2 muestra las diferentes variables involucradas en éste circuito, así como su descripción, unidades y rango numérico.

<i>Variables Resultado</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
\dot{Q}_{evap}	Calor por unidad de tiempo que el evaporador cede al fluido	kJ/s	*
x_8	Calidad mezcla vapor-líquido en la posición 8	Fracción	0 – 1
<i>Variables de Restricción</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
$x_6 = x_7$	Calidad mezcla vapor-líquido en la posición 6 y 7	Fracción	0
x_9	Calidad mezcla vapor-líquido en la posición 9	Fracción	0 – 1
\dot{m}_{max}	Flujo de masa máximo posible en el circuito	kg/s	60 – 100
<i>Variables Dinámicas</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
$h_6 = h_7$	Entalpía específica en la posición 6 y 7	kJ/kg	*
h_8	Entalpía específica en la posición 8	kJ/kg	*
h_9	Entalpía específica en la posición 9	kJ/kg	*
T_{sat}	Temperatura de saturación para el cambio de fase de líquido a vapor en el evaporador	°C	*
$\dot{m} = \dot{m}_6 = \dot{m}_9$	Flujo de masa que entra y sale del domo	kg/s	0 – \dot{m}_{max}
<i>Variables de Exploración</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
p_d	Presión del domo	kPa	2,000 - 10,000
f_d	Fracción de apertura de la válvula en la posición 6	Fracción	0 – 1
\dot{m}_7	Flujo de masa que se envía al evaporador	kg/s	0 – 100

* Se calculan automáticamente en la simulación

Tabla 4.2 Variables correspondientes al Circuito 2 –Domo

Como restricción se supone que el líquido que llega en (6) al domo, proveniente del economizador, está saturado. Asimismo se supone que el líquido que sale del domo en (7) hacia el evaporador también está saturado. Es decir,

$$x_6 = x_7 = 0$$

El objetivo será calcular la calidad de vapor en (8), x_8 , y la cantidad de calor por unidad de tiempo que entrega el evaporador al líquido saturado que le llega (\dot{Q}_{evap}), con una calidad en (8) lo más cercana a 1 posible.

El procedimiento para encontrar la calidad en (6) es el siguiente:

Primero se calcula la entalpía en (6) y la entalpía en (9) como líquido saturado,

$$h_6(p_d), h_9(p_d)$$

Conociendo f_d se puede calcular,

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_9 = \dot{m} = f_d \dot{m}_{max}$$

Asimismo se tiene que $h_6 = h_7$ ya que se tiene en ambos puntos líquido saturado a la misma presión (y misma temperatura).

De la Ecuación 4.3 se puede calcular h_8 mediante:

$$h_8 = \frac{\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}(h_9 - h_6)}{\dot{m}_7}$$

Es decir,

$$h_8 = h_7 + \frac{\dot{m}(h_9 - h_6)}{\dot{m}_7}$$

Ecuación 4.4

La calidad de la mezcla líquido-vapor en (8) es entonces:

$$x_8 = \frac{(h_8 - h_6)}{(h_9 - h_6)}$$

Ecuación 4.5

Si $x_8 > 1$, entonces el sistema muestra un mensaje de error al operador y le señala que debe aumentar el flujo másico que pasa a través del evaporador \dot{m}_7 , para que la calidad en (8) disminuya, ya que la calidad nunca puede ser mayor a 1.

Finalmente la cantidad de calor proporcionada por el evaporador se calcula de la Ecuación 4.3.

4.3.5 Circuito 3 – Deareador

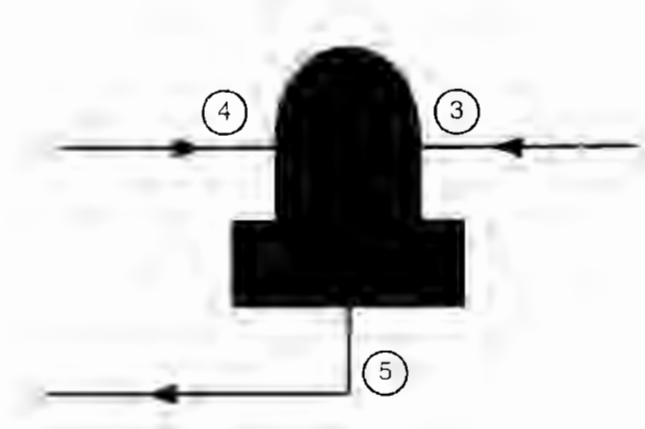


Figura 4.8 Circuito 3 – Deareador

Consideramos que en estado estacionario el intercambio de energía en el deareador se realiza a presión constante. Es decir:

$$p_3 = p_4 = p_5 = p_{der}$$

Sin embargo, la temperatura del fluido en estos puntos es distinta.

El objetivo del deareador es precalentar el agua proveniente del condensador (4) tanto como sea posible antes de enviarla al economizador (5) sin que ocurra el fenómeno de Cavitación³ [22].

4.3.5.1 Conservación de la masa en el deareador

Se tiene que,

$$\dot{m}_4 + \dot{m}_3 = \dot{m}_5$$

Ecuación 4.6

Aquí \dot{m}_5 representa el flujo másico principal en la tubería, por lo tanto,

$$\dot{m}_5 = \dot{m}$$

4.3.5.2 Conservación de la energía en el deareador

Se tiene que,

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_5 h_5$$

Ecuación 4.7

A diferencia de los demás circuitos, hay variables resultado que son aquellas variables que se calculan a partir de las variables de restricción y dinámicas (ver Tabla 4.3).

³ Cavitación, es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada (aspas de la turbina de vapor), produciendo una descompresión del fluido, provocando que se formen cavidades (burbujas), que produce corrosión en las tuberías y las aspas de la turbina de vapor.

<i>Variables Resultado</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
\dot{m}_5	Flujo de masa en la posición 5	kg/s	0 – 60
T_5	Temperatura en la posición 5	°C	*
<i>Variables de Restricción</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
p_{dear}	Presión del deareador	kPa	40 – 300
T_5'	Temperatura de saturación correspondiente a la presión del deareador	°C	*
$T_5(sat)$	Temperatura de saturación correspondiente a la presión del deareador	°C	*
<i>Variables Dinámicas</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
h_3	Entalpía específica en la posición 3	kJ/kg	*
h_4	Entalpía específica en la posición 4	kJ/kg	*
h_5	Entalpía específica en la posición 5	kJ/kg	*
<i>Variables de Exploración</i>			
Variable	Descripción	Unidades	Rango
T_3	Temperatura en la posición 3	°C	100 – 500
T_4	Temperatura en la posición 4	°C	40 – 80
\dot{m}_3	Flujo de masa en la posición 3	kg/s	0 – 10
\dot{m}_4	Flujo de masa en la posición 4	kg/s	40 – 50

* Se calculan automáticamente en la simulación

Tabla 4.3 Variables correspondientes al Circuito 3 – Deareador

4.3.5.3 Metodología

El flujo másico total se encuentra de la Ecuación 4.6. Por otra parte, se calculan las entalpías en los puntos (3) y (4).

$$\dot{h}_3(T_3, p_{der}), \dot{h}_4(T_4, p_{der})$$

Por lo tanto la entalpía en (5) se calcula de la Ecuación 4.7,

$$\dot{h}_5 = \frac{\dot{m}_4 \dot{h}_4 + \dot{m}_3 \dot{h}_3}{\dot{m}_5}$$

Posteriormente, se calcula la temperatura T_5 ,

$$T_5(\dot{h}_5), p_{dear}$$

Por último se evalúa la temperatura de saturación correspondiente a la presión del deareador,

$$T_{sat}(p_{dear})$$

Si,

$$T_5 \geq T_{sat} + 2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces existe peligro de cavitación. El sistema envía una alerta al operador, quien debe cambiar las variables de exploración para que esto no suceda. Las opciones son aumentar \dot{m}_4 y/o disminuir \dot{m}_3 , o también, disminuir T_4 y/o T_3 . Observemos que se tomó un margen de seguridad de 2°C para lanzar esta alerta.

4.4 Modelo del estudiante del sistema tutor inteligente

En el capítulo 3 se mencionó que el modelo del estudiante permite evaluar y seleccionar las acciones pedagógicas requeridas para cada estudiante, debido a que contiene el conocimiento sobre el progreso del estudiante, sus preferencias, historia, errores y estilos de aprendizaje, entre otros. Este modelo se crea y actualiza al recolectar datos de diversas fuentes, por lo que es esencial que el estudiante interactúe constantemente con el STI.

Las Redes Bayesianas y sus componentes (relaciones y tablas probabilísticas) fueron definidas con la ayuda de un experto en el dominio y modeladas con el programa *Elvira*⁴, mismo programa que se utilizó para la propagación de evidencia e inferencia de conocimiento. De esta forma se logró calibrar de manera correcta el modelo del estudiante para el sistema tutor inteligente.

Para el entrenamiento de operadores de plantas eléctricas, se han diseñado diversas Redes Bayesianas que permiten modelar y evaluar el conocimiento de cada uno de los experimentos que forman parte del STI.

Cabe señalar que como caso de estudio se realizó el modelo del estudiante para el circuito 1.

4.4.1 Circuito 1 – Turbina de Vapor

Debido a que el circuito se comporta muy diferente de acuerdo a los rangos de potencia solicitada, para el circuito 1 se modelaron tres diferentes Redes Bayesianas, cada una corresponde al tipo de potencia meta (baja, media, alta) que se le pide alcanzar al operador en la simulación de la turbina de vapor. Es importante mencionar que la estructura de las tres redes es la misma, sin embargo la tabla de relación probabilística para cada nodo aleatorio es diferente entre cada red (potencia baja, media y alta).

El tipo de potencia demandada define la Red Bayesiana (RB) a utilizar para la propagación de evidencia, y se muestra a continuación en la siguiente tabla.

⁴ *Elvira* es una herramienta que ayuda a la construcción de modelos basados en decisiones. El programa cuenta con un lector-intérprete para los modelos, una interfaz gráfica para la construcción de redes, algoritmos exactos y aproximados (estocásticos) de razonamiento tanto para variables discretas como continuas, métodos de explicación del razonamiento, algoritmos de toma de decisiones, aprendizaje de modelos a partir de bases de datos, fusión de redes, etcétera [27].

Potencia Meta	Tipo de potencia meta	Red Bayesiana
≥ 65 MW	Alta	Para potencia alta
≥ 35 MW y < 65 MW	Media	Para potencia media
< 35 MW	Baja	Para potencia baja

Tabla 4.4 Rangos de potencia meta para el circuito 1

Las tres RB cuentan con los mismos nodos (o variables), los cuales se pueden ver en la Figura 4.9. A continuación se explica a detalle cada nodo:

Los nodos T1, P1 y FV corresponden a las tres variables de exploración que el operador es capaz de manipular en la simulación.

T1: Variable correspondiente a la temperatura en el punto (1).

P1: Variable correspondiente a la presión en el punto (1).

FV: Variable correspondiente a la fracción de apertura de las válvulas de control de vapor.

Como se vio en la Tabla 4.1 antes. Cabe mencionar que la variable p_3 , variable correspondiente a la presión en el punto (3), no se toma en cuenta en la RB, pero es necesaria para realizar los cálculos del experimento.

El nodo **ERROR_RELATIVO** corresponde al rango de error que el operador tiene entre la potencia generada y la potencia meta.

Los nodos de **PRESION** y **TEMPERATURA** son subconceptos que pertenecen al concepto de conservación de energía (nodo **CONSERV_ENERGIA**).

El nodo **FLUJO_MASICO** es un subconcepto de conservación de la masa (nodo **CONSERV_MASA**).

POTENCIA_MECANICA: Es la potencia que el operador genera en el experimento.

POTENCIA_GENERADA: Es la potencia real que la T.V. genera dependiendo de la eficiencia del generador eléctrico.

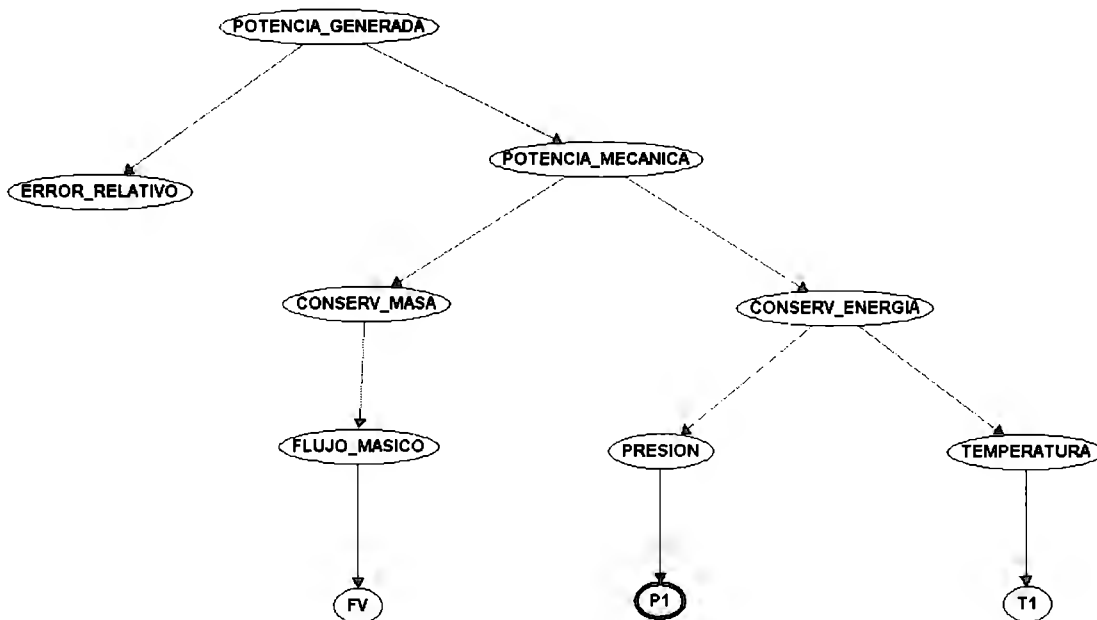


Figura 4.9 Red Bayesiana de potencia baja para el primer circuito

Como se observa en la Figura 4.9 cada nodo cuenta diferente número y tipo de valores. Para el nodo **ERROR_RELATIVO** se tienen los valores: Bien, Regular y Malo. Estos valores son considerados como *evidencia*, el valor que sea asignado al nodo depende de valor numérico que la variable *error_{relativo}* tenga al momento de que el operador realice el experimento correspondiente al circuito 1. Los rangos de este nodo son definidos como se muestra a continuación:

- Bien: $0 \leq er \leq 0.2$
- Regular: $0.2 < er \leq 0.35$
- Mal: $0.35 < er$

Los nodos **FV**, **P1** y **T1** también son considerados *evidencia*, y dependen del valor numérico que el operador fije al momento de manipular estas variables de exploración. Los valores de estos nodos están divididos en: Alta, Media y Baja. Los rangos para cada variable son los siguientes:

Baja:

- $0 \leq \mathbf{FV} < 0.4$ Fracción
- $2,000 \leq \mathbf{P1} < 5,000$ kPa
- $200 \leq \mathbf{T1} < 350$ °C

Media:

- $0.4 \leq \mathbf{FV} \leq 0.6$ Fracción
- $5,000 \leq \mathbf{P1} \leq 7,000$ kPa
- $350 \leq \mathbf{T1} \leq 500$ °C

Alta

- $0.6 < FV \leq 1$ Fracción
- $7,000 < P1 \leq 10,000$ kPa
- $500 < T1 \leq 650$ °C

Los nodos **TEMPERATURA**, **PRESION**, **FLUJO_MASICO**, **CONSERV_ENERGIA**, **CONSERV_MASA**, **POTENCIA_MECANICA** y **POTENCIA_GENERADA** sólo cuentan con los valores: Presente y Ausente. Es decir, estas variables nos sirven para saber la probabilidad de que el operador sepa (Presente) o no (Ausente) cualquiera de estos conceptos. En un principio no se conoce el valor de estas variables, pero una vez que se cuenta con la evidencia y se realiza el proceso de inferencia, estas variables son instanciadas y es posible conocer su valor, el cual determina si el operador sabe o no alguno de los conceptos.

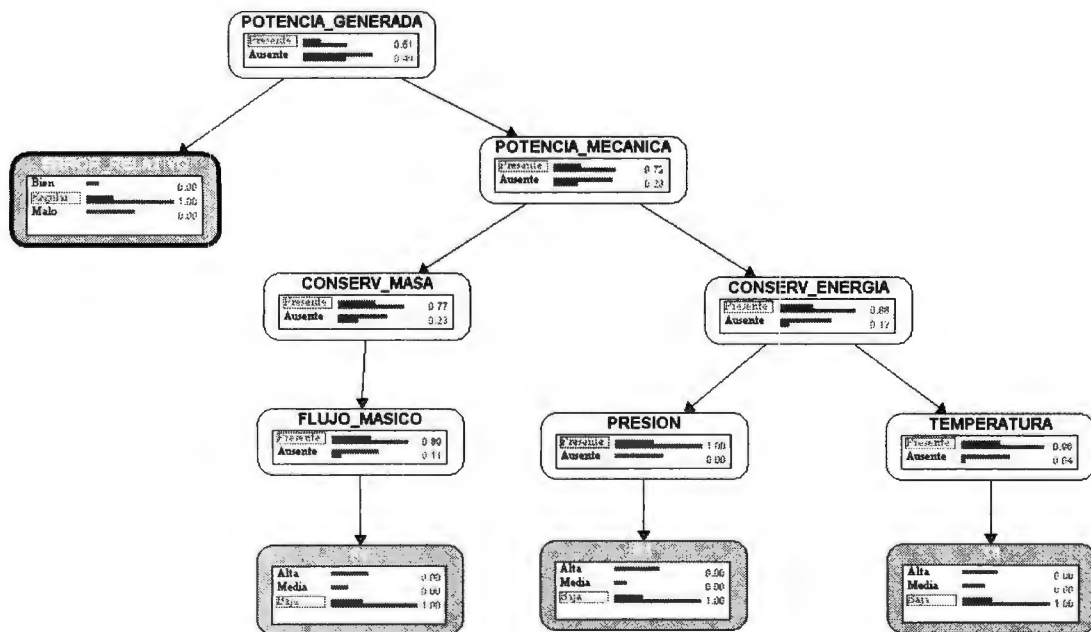


Figura 4.10 Red Bayesiana de potencia baja para el primer circuito (con propagación de evidencia)

Cada nodo cuenta con su tabla de relaciones probabilísticas; por ejemplo, para la variable P1 de la red bayesiana de potencia baja (ver Figura 4.10) es la siguiente:

PRESION	Presente	Ausente
Alta	0.05	0.9
Media	0.2	0.1
Baja	0.75	0.0

Tabla 4.5 Tabla de relación probabilística para P1 de la RB de potencia baja

La Tabla 4.5 representa la relación probabilística que tiene la variable P1 con la variable PRESION. Por ejemplo, hay un 75% de probabilidad de que el concepto PRESION se encuentre presente si se elige un valor ALTO para la variable P1. Esto quiere decir que si el operador elije

un valor bajo para la presión en el punto (1) del circuito de la T.V. es muy probable que conozca el concepto de presión. En el caso contrario, hay un 90% de probabilidad de que el operador no conozca el concepto de presión si escogió un valor alto para la variable de presión en el punto (1).

Las Redes Bayesianas restantes y sus tablas de relación probabilística correspondientes al circuito 1 se explican con mayor detalle en el Apéndice E.

4.5 Modelo del tutor del sistema tutor inteligente

El modelo del tutor es el responsable del proceso instruccional, ya que crea sesiones de entrenamiento a través de modelos didácticos y objetivos pedagógicos establecidos. Este componente está muy ligado al modelo del estudiante, ya que al combinar los objetivos pedagógicos con el conocimiento sobre el estudiante, se pueden determinar las actividades que se presentarán al estudiante: si es necesario presentar explicaciones, si se debe dar retroalimentación, etc.

Al igual que el modelo del estudiante, las Redes de Decisión y sus componentes (relaciones y tablas) fueron definidas con la ayuda de un experto en el dominio, y se utilizó el programa *Elvira* para modelar y realizar la propagación de evidencia en dichas redes. De esta forma se logró calibrar de manera correcta el modelo del tutor.

El modelo del tutor se encuentra disponible para el circuito 1 como parte del caso de estudio.

4.5.1 Circuito 1 – Turbina de Vapor

Para poder elegir el objetivo pedagógico más apropiado para el operador, se generaron dos diagramas de influencia o redes de decisión (ver figura 4.11). Un diagrama de influencia calcula la máxima utilidad esperada, dada la evidencia de cada experimento, y muestra la mejor acción pedagógica para el operador.

Uno de los diagramas de influencia está dirigido a potencias metas altas y bajas, y el otro diagrama es sólo para potencias medias. Esto debido a que el proceso para generar una potencia alta o baja es muy parecido, y si el operador resuelve correctamente un experimento (de potencia alta/baja) su siguiente experimento debe ser uno de potencia media. En el caso de la red de decisión para potencia media, el proceso para obtener dicha potencia meta no es tan trivial y la decisión pedagógica es más complicada.

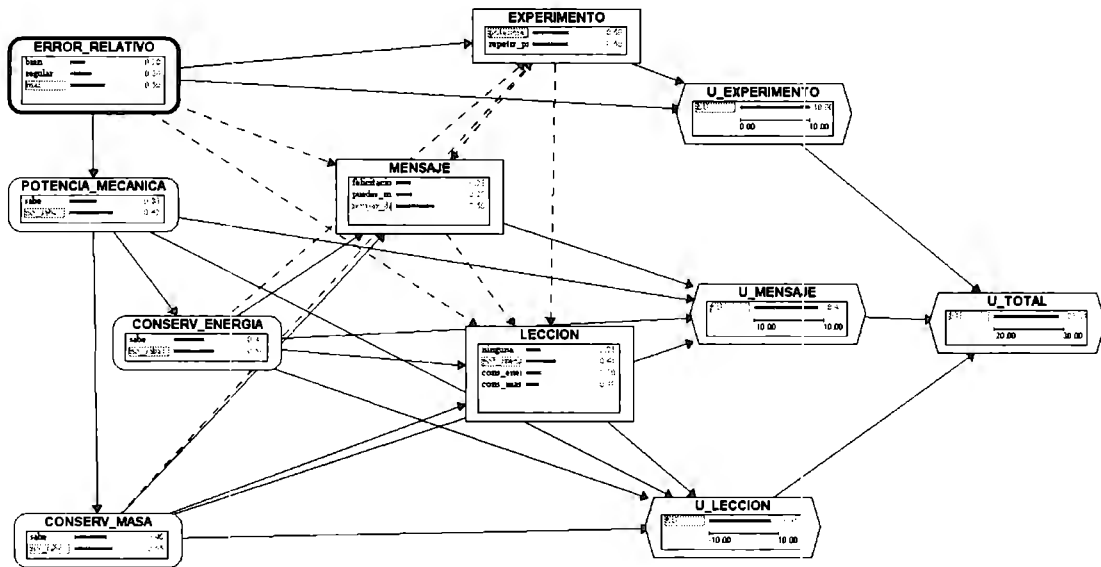


Figura 4.11 Red de Decisión para potencia alta/baja del primer circuito

Como se ve en la Figura 4.11, se cuenta con tres diferentes tipos de nodos. Los nodos amarillos (forma ovalada) son llamados nodos aleatorios, y estos representan las variables que se encuentran en las RB antes descritas. Los nodos azules (forma rectangular) son nodos de decisión, y representan la decisión que se ha hecho en un momento determinado, los valores de estos nodos representan las acciones de las cuales se puede elegir. Por último, los nodos verdes (forma de hexágono) representan la utilidad, es decir, cada nodo de utilidad tiene una tabla de utilidad asociada con una entrada para cada instancia posible de sus padres (nodos de decisión, en este caso).

El proceso para el algoritmo de las redes de decisión es el siguiente:

1. Añadir todas las evidencias disponibles: Los valores de los nodos aleatorios, los cuales se infirieron en su RB correspondiente (potencia alta, baja, media) por medio de la interacción con la simulación.
2. Para cada valor de acción en los nodos de decisión:
 - i. Se calculan las probabilidades de los nodos padres del nodo de utilidad, al igual que en las RB, utilizando un algoritmo de inferencia estándar.
 - ii. Se calcula la utilidad esperada resultante para cada acción.
3. Por último, se devuelve la acción con la mayor utilidad esperada; es decir se devuelve la acción pedagógica que se va a tomar. Para el nodo **EXPERIMENTO**, es el siguiente experimento que se le va a presentar al operador. Para el nodo **MENSAJE**, es el mensaje que se le presenta al operador de acuerdo a su desempeño en el experimento que acaba de resolver. Para el nodo **LECCION**, la acción pedagógica correspondiente a la serie de ayudas/lecturas que se le proponen al operador revisar, dependiendo de su desempeño en el experimento que acaba de resolver.

Las posibles acciones para cada nodo de decisión son las siguientes:

- **EXPERIMENTO:** repetir problema (mismos valores del experimento actual), potencia alta, potencia baja y potencia media.
- **MENSAJE:** ¡Felicitaciones!, Puedes mejorar, Revisa de nuevo todos los conceptos relacionados con la generación de potencia eléctrica.
- **LECCION:** Ninguna, lecciones relacionadas con conservación de la energía, lecciones relacionadas con conservación de la masa, y lecciones relacionadas con potencia mecánica.

Todas las redes de decisión y sus tablas involucradas para el modulo del tutor del circuito 1, se encuentran en el Apéndice F.

Capítulo 5

5 Proceso de Evaluación

En este capítulo se describe el proceso que se llevó a cabo para evaluar *SiEntrenO*, los diferentes usuarios que interactuaron con la herramienta y los cuestionarios que se utilizaron para obtener estadísticas acerca de su usabilidad y facilidad de uso. Las pruebas se llevaron a cabo con dos públicos:

- A. Miembros de la cátedra de investigación de *e-Learning* del ITESM Campus Ciudad de México (CCM), conformada por alumnos de posgrado en ciencias de la computación y profesores del área de matemáticas, física y computación, además de profesores invitados del área de termodinámica.
- B. Dos grupos de la materia “Balance de Energía”; uno en el ITESM Campus Santa Fe (CFS) conformado por 11 alumnos y el otro del ITESM CCM conformado por 17 alumnos. Ambos grupos cursan el 3er semestre de la carrera de Ingeniería en Biotecnología, y en el plan de estudios de la materia llevan el tema de “Turbinas de Vapor”.

Para efectos prácticos de aquí en adelante al público A se le llamará sólo “Grupo de Profesores” y al B “Grupo de Alumnos”.

Es conveniente señalar que el proceso de evaluación sólo se llevó a cabo con el Circuito 1 (turbina de vapor), caso de estudio de este trabajo, ya que como se ha mencionado previamente, el circuito 1 es el único que cuenta con el STI integrado.

En el caso de los profesores también se les mostró los circuitos 2 y 3, que aunque no cuentan con el STI integrado, las simulaciones realizan correctamente las operaciones físicas y el modelado en 3D de cada circuito se puede visualizar adecuadamente.

5.1 Cuestionario de Usabilidad

Para la evaluación de usabilidad de *SiEntrenO*, se utilizó un cuestionario con preguntas relacionadas a la facilidad de uso de la herramienta. El cuestionario se montó en el sitio web www.surveymonkey.com, que ofrece el servicio de crear encuestas para que puedan ser contestadas en línea.

Para ser utilizable, un producto o servicio debe ser útil, eficiente, efectivo, satisfactorio, que se pueda aprender y accesible [23]. El **Cuestionario de Usabilidad** completo se encuentra en el Apéndice H.

5.2 Pre y Post-Test

En el pre-test y post-test se evaluó el dominio que los usuarios tienen sobre los conceptos básicos que rigen el funcionamiento de una CTCC, como son: la entalpía, la entropía, el flujo másico, la

conservación de la masa, la conservación de la energía, entre otros. Estos conceptos fueron los que se modelaron en las Redes Bayesianas y Redes de Decisión.

El cuestionario es el mismo para el pre-test y el post-test, el cual cuenta con 24 preguntas de opción múltiple (ver Apéndice G). Este cuestionario se integró junto con *SiEntrenO* para así poder recolectar la información de los resultados en la Base de Datos del sistema y tener un mejor control al momento de realizar el análisis de los resultados.

5.3 Pruebas con Profesores

Para las pruebas se empezó con el grupo de profesores, para el cual se realizó sesión especial, cuya agenda fue la siguiente:

1. Introducción de la herramienta.
2. Los usuarios contestan el Pre-Test (T.V.).
3. Los usuarios interactúan con la simulación (T.V.) durante un tiempo aproximado de 30 minutos.
4. Los usuarios contestan el Post-Test (T.V.).
5. Los usuarios contestan el Cuestionario de Usabilidad (T.V.).
6. Se hace una demostración del funcionamiento de los circuitos 2 y 3.
7. Comentarios y Preguntas.

5.4 Pruebas con Alumnos

El proceso de pruebas con el grupo de alumnos se llevó a cabo durante el semestre enero-mayo del 2012, y los pasos que se siguieron fueron los siguientes:

1. El profesor de la materia les asigna a los alumnos como actividad el uso de *SiEntrenO* con la simulación del circuito 1.
2. Los alumnos con ayuda del Manual de Usuario (ver Apéndice D) realizan la actividad. En resumen se realizan los siguientes pasos:
 - a. Primero contestan el pre-test (sólo una vez).
 - b. El sistema se deja abierto por un periodo de 15 días para que puedan interactuar con la simulación del Circuito 1 – Turbina de Vapor.
 - c. Contestan el post-test (sólo una vez, al final de haber realizado la simulación).
 - d. Por último, contestan el Cuestionario de Usabilidad.

5.5 Reflexión sobre el Proceso de Evaluación

El proceso de evaluación permitió conocer la opinión de los usuarios acerca de la herramienta y su utilidad. El contar con dos públicos diferentes, profesores y alumnos, nos permite tener una visión más amplia de las opiniones que los diferentes tipos de usuarios pueden tener acerca de la herramienta. Además, el proceso de evaluación con los grupos de “Balance de Energía” fue muy constructivo, ya que en su plan de estudio revisan los mismos conceptos que se aplican al funcionamiento físico del Circuito 1 (T.V.). Debido a esto pensamos que el análisis de *SiEntrenO*, se realiza con mayor objetividad por parte de los alumnos.

Los datos recaudados en el proceso de evaluación de la herramienta se utilizaron para llevar a cabo un análisis detallado que se presenta en el siguiente capítulo.

Capítulo 6

6 Resultados y Discusión

Después de aplicar el proceso de prueba exitosamente y recopilar la información obtenida por *SiEntrenO*, para el caso de estudio de este trabajo (circuito 1), se realizó un análisis detallado de diferentes aspectos, como el desempeño, la usabilidad y la ganancia de aprendizaje.

El cuestionario de usabilidad (ver Apéndice H) permitió tener una visión general de que aspectos de *SiEntrenO* considera útiles el usuario. Por medio del pre-test y post-test se pudo obtener el impacto de aprendizaje en los usuarios después de interactuar con la simulación (circuito 1) y el STI que ofrece la herramienta *SiEntrenO*.

A continuación se presenta el análisis detallado de los resultados obtenidos por el cuestionario de usabilidad y por el pre/post-test aplicado a los usuarios.

6.1 Cuestionario de Usabilidad

Para el análisis de resultados del cuestionario de usabilidad se juntaron los dos públicos (el grupo de profesores y el de alumnos) mencionados en el capítulo 5.

A continuación se presenta una gráfica, que refleja las preferencias que permiten que una herramienta de *software* sea del agrado del usuario y por tanto ser utilizada. Donde el número 1 corresponde a la característica más importante para una herramienta de *software* y el 6 es la menos importante (ver Figura 6.1).

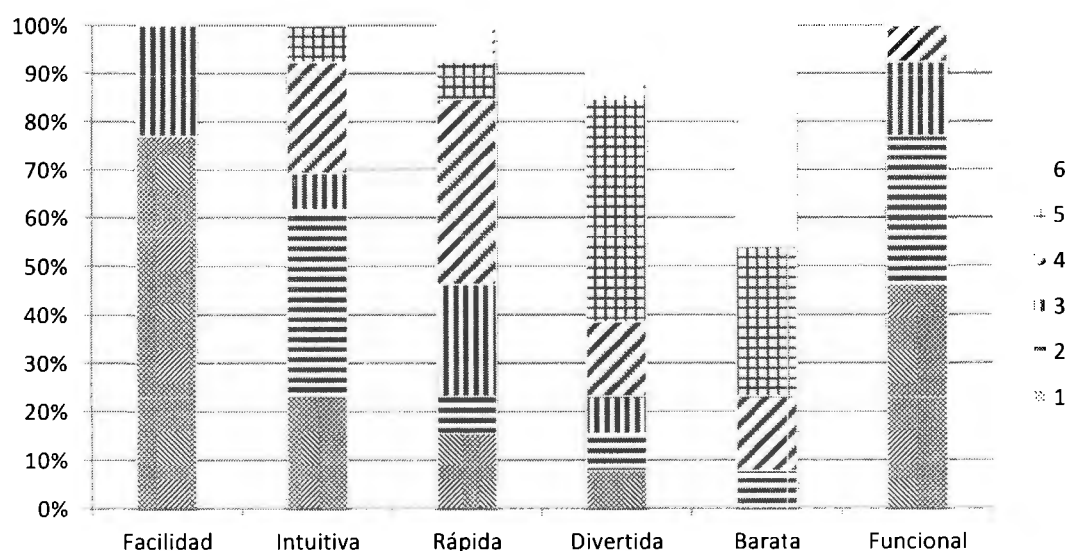


Figura 6.1 Características más importantes para el uso de una herramienta de software

Como se puede observar en la gráfica anterior, los usuarios consideran que la facilidad de uso es la característica más importante al momento del uso de una herramienta de software. Por otra parte, la segunda característica más importante para los usuarios es la funcionalidad de la herramienta. En cuanto a que una herramienta de software sea intuitiva, rápida, divertida y barata son aspectos que fueron menos relevantes en los resultados obtenidos. Los usuarios, tanto alumnos como profesores, consideran que los simuladores ayudan en el proceso de enseñanza y que definitivamente lo utilizarían.

En otra pregunta, se les pidió a los mismos usuarios calificar el uso de la herramienta *SiEntrenO* después haber empleado las simulaciones para el entrenamiento de operadores novatos de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC). Se consideraron doce afirmaciones que representan propiedades de usabilidad, con una escala de Linkert [24] que considera cinco niveles para evaluar cada característica de *SiEntrenO*, a saber:

1. Totalmente de acuerdo
2. De acuerdo
3. Indiferente
4. En desacuerdo
5. Totalmente en desacuerdo

Las afirmaciones que se utilizaron para las propiedades de usabilidad fueron:

- P1. Los pasos para el uso de una simulación son sencillos
- P2. La configuración de variables de los objetos fue intuitiva
- P3. Los modelos presentados funcionaron correctamente
- P4. La animación es consistente
- P5. El modelo físico es consistente
- P6. El ambiente de entrenamiento brinda una presentación atractiva.
- P7. El lenguaje gráfico es agradable.
- P8. La distribución de los paneles que conforman el simulador me parece adecuada
- P9. La retroalimentación que brinda el Sistema Tutor Inteligente considero que es de utilidad para mis estudiantes
- P10. Recomendaría este ambiente a mis colegas.
- P11. En general, *SiEntrenO* me parece útil como herramienta de apoyo a mis cursos
- P12. Usaría estas simulaciones en los cursos que imparto

En la Figura 6.2 se muestra una gráfica en donde los usuarios califican, de acuerdo a la escala Linkert, cada una de las propiedades de usabilidad. Siendo el 1, cuando están totalmente de acuerdo con la afirmación y en contraste, siendo el 5 cuando se encuentran en total desacuerdo con la afirmación hecha. Como se observa en la gráfica, la mayoría de los usuarios están totalmente de acuerdo y de acuerdo con las doce afirmaciones propuestas para evaluar la usabilidad de la herramienta.

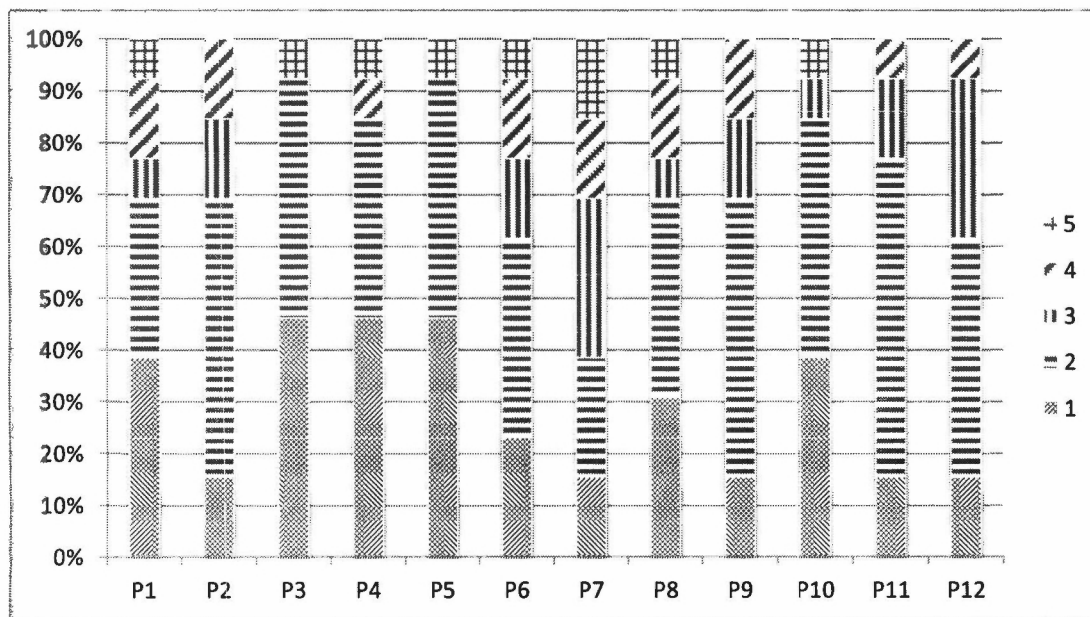


Figura 6.2 Gráfica de propiedades de usabilidad para SiEntrenO

En la Figura 6.3 se presentan los porcentajes obtenidos para los 5 niveles de Linkert, de la afirmación P1 a la P12, del cuestionario de usabilidad. Donde se observa que la mayoría de los usuarios que evaluaron la herramienta *SiEntrenO* consideraron que es adecuada, ya que un 29% de los encuestados califica como “**totalmente de acuerdo**” las doce afirmaciones que se hacen acerca de la usabilidad de la herramienta, mientras que otro 43% califican la califican como “**de acuerdo**”. Por otra parte nos encontramos con un 10% y 6% para **en desacuerdo** y **totalmente en desacuerdo**, esto puede deberse a que no todos los usuarios evaluados están familiarizados con los conceptos que rigen el funcionamiento del caso de estudio (Circuito 1 - Turbina de Vapor).

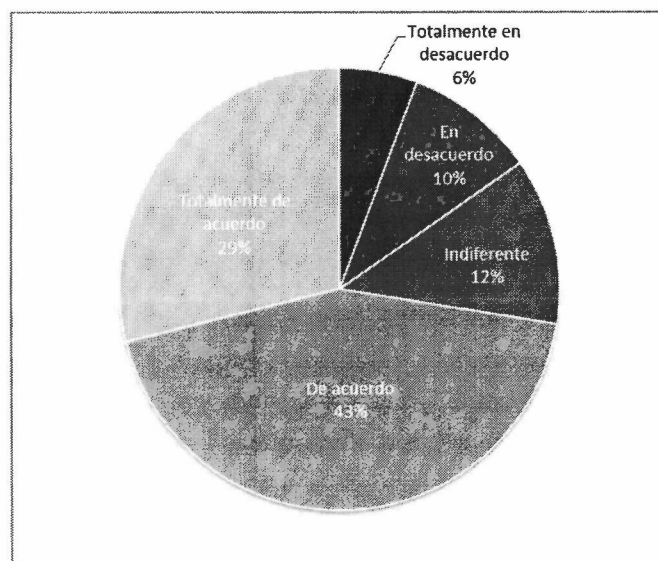


Figura 6.3 Porcentajes para las propiedades de usabilidad

6.2 Ganancias de Aprendizaje

Para cuantificar el impacto de la herramienta en el aprendizaje, se aplicó la metodología en la que se aplica un pre-test inicial de conocimientos, se permite que el grupo emplee la herramienta y al final se aplica un post-test muy similar al pre-test inicial. Para esta evaluación se consideraron los dos públicos mencionados con anterioridad.

A continuación se realiza un análisis de la ganancia de aprendizaje que se observó en estos dos públicos.

6.2.1 Grupo de Profesores

La Tabla 6.1 muestra los resultados del pre-test y el post-test para el grupo de profesores. En general, se puede observar un aumento de aciertos en el Post-Test después de haber utilizado la herramienta *SiEntrenO* con la simulación correspondiente al Circuito 1 – Turbina de Vapor.

Usuario	Pre-Test	Post-Test
1	22	22
2	23	24
3	11	10
4	13	14
5	16	18
6	17	15
7	8	11
8	22	24
9	20	23

Tabla 6.1 Resultados de Pre/Post – Test del grupo de profesores

En la Figura 6.4 podemos observar una gráfica en donde se muestran las líneas de promedio para el pre-test y post-test, y se observa que efectivamente sí hubo una ganancia de aprendizaje en los usuarios después de usar *SiEntrenO*. La ganancia no es demasiada, ya que el promedio para el pre-test es de 16.89 y de 17.89 para el post-test, esto se debe a que en el grupo que se está analizando hay alumnos y profesores que no pertenecen al área de física. Es por esta razón que en la gráfica se observan algunos puntos bajos para el pre-test y post-test que afectan al promedio de ambos cuestionarios, además de que el uso de la simulación para este grupo solo fue un par de minutos (30 minutos aproximadamente). La ganancia de aprendizaje para este grupo de usuarios es de 2.73%, y se calculó con la siguiente fórmula [25]:

$$G = \frac{(\text{promedio del posttest}) - (\text{promedio del pretest})}{100 - (\text{promedio del pretest})}$$

Ecuación 6.1 Porcentaje de Ganancia de Aprendizaje.

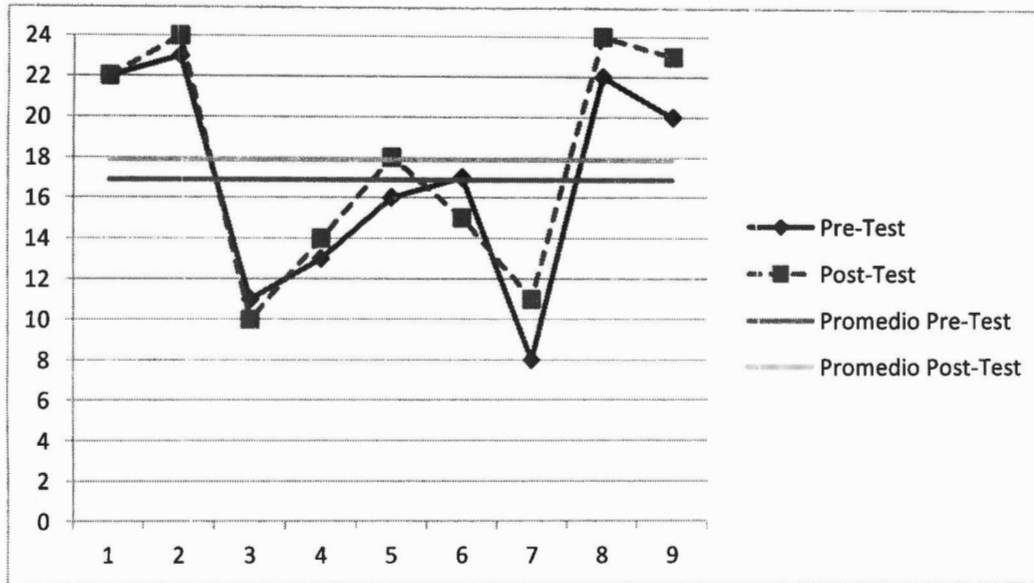


Figura 6.4 Gráfica con promedios del grupo de profesores

6.2.2 Grupo de Alumnos

La Tabla 2.1 muestra los resultados del pre-test y post-test para el grupo del ITESM Campus Santa Fe (CSF). Se cuenta con 11 muestras, en las que se puede observar que el número de aciertos aumento después de haber utilizado la simulación (circuito – 1) de *SiEntrenO*, durante 15 días.

Usuario	Pre-Test	Post-Test
1	22	20
2	18	19
3	17	20
4	15	16
5	14	18
6	14	14
7	16	21
8	15	21
9	13	15
10	15	18
11	15	14
12	14	15

Tabla 6.2 Resultados del Pre/Post – Test para el grupo de ITESM CSF

En la Figura 6.5 se puede observar que la diferencia entre los dos promedios es de más de dos aciertos, 2.33 para ser exacto, que es la diferencia entre el promedio del pre-test que es de 14.56 y del post-test que corresponde a 16.89. En este caso la dispersión de los resultados no es demasiada, ya que el grupo de “Balance de Energía” lleva el tema de turbinas de vapor en su plan de estudios, por lo que están más familiarizados con los conceptos que se preguntan en el pre-test

y post-test. Para este grupo, la ganancia de aprendizaje fue de 2.73% que se calculó con la Ecuación 6.1.

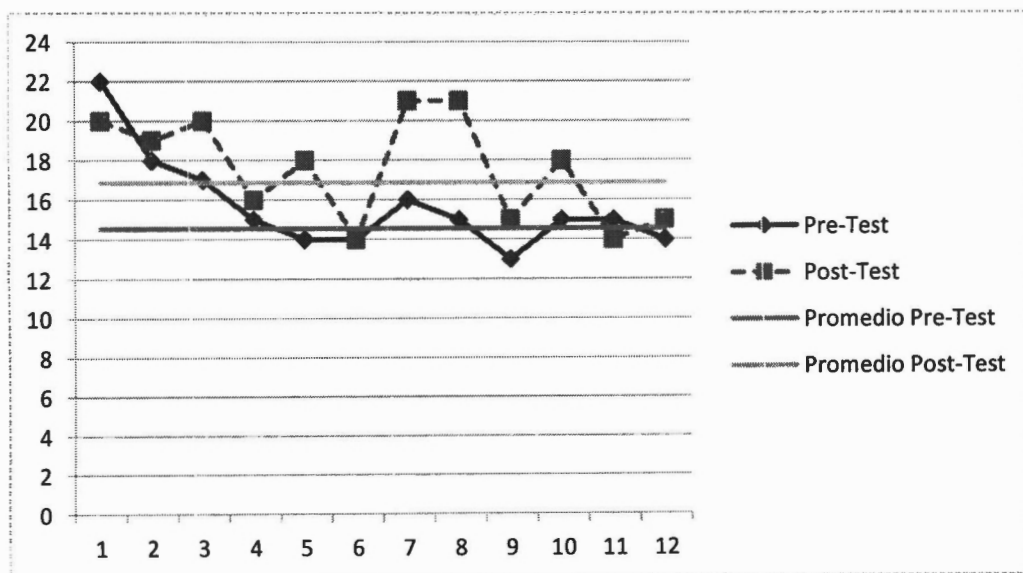


Figura 6.5 Gráfica con promedios para el grupo de ITESM CSF

La Tabla 6.3 muestra el resultado del pre-test y post-test para el grupo del ITESM CCM, en donde se puede observar un ligero aumento después de haber realizado la simulación del Circuito 1 – Turbina de Vapor, por parte de los alumnos de la materia de “Balance de Energía”.

Usuario	Pre-Test	Post-Test
1	15	15
2	18	15
3	16	18
4	17	18
5	18	18
6	14	14
7	15	20
8	19	22
9	16	19
10	16	16
11	12	8
12	15	15
13	16	14
14	13	15
15	15	12
16	14	17
17	16	19

Tabla 6.3 Resultados del Pre/Post – Test para el grupo de ITESM CCM

En la Figura 6.6 podemos observar los resultados del grupo del ITESM CCM. El promedio correspondiente al pre-test es de 14.78 y de 15.0 para el post-test y la ganancia de aprendizaje es de 0.26% (ver Ecuación 6.1), y aunque es poco la ganancia de aprendizaje, se observa un aumento de aciertos después de haber utilizado la herramienta *SiEntrenO*.

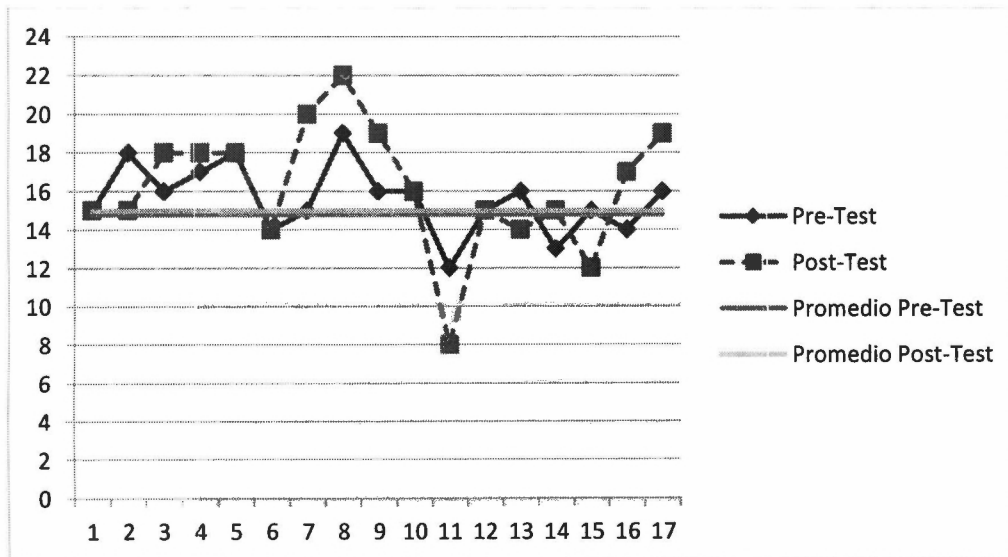


Figura 6.6 Gráfica con promedios para el grupo de ITESM CCM

En la Figura 6.6 se observa una irregularidad en el alumno de prueba 11, donde su calificación del pre-test de 12 aciertos baja a 11 en el post-test. Probablemente se debe a que el alumno no le puso el interés debido a la prueba, lo que provoca una disminución considerable al momento de calcular la ganancia de aprendizaje. Ya que sin considerar al alumno 11 la ganancia de aprendizaje sube de un 0.26% a un 0.88%.

En general los usuarios concuerdan en que el uso de simulaciones ayuda al aprendizaje y que definitivamente utilizarían simulaciones en sus cursos. Por otra parte varios usuarios comentan que un simulador debe amigable, pero que debido a la naturaleza del tema de las simulaciones, una interfaz muy amigable o gráfica podría distraer a los usuarios.

Capítulo 7

7 Conclusiones y Trabajo a Futuro

La compleja operación y conceptos físicos que se involucran en el funcionamiento de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado pueden ser difíciles de comprender para un operador novato. Sin embargo, con la ayuda de nuevos recursos y herramientas que se desarrollan con Tecnologías de Información, se pueden diseñar STIs como *SiEntrenO* que proporcionen un buen ambiente de aprendizaje activo para los operadores. Este sistema se comporta de manera adaptativa, proporcionando ayudas pedagógicas dependiendo de la interacción del usuario con el sistema.

7.1 Aporte Computacional

Con el desarrollo del “Sistema Tutor Inteligente con Simulaciones para el Entrenamiento de Operadores Novatos de una Planta Eléctrica de Ciclo Combinado”, *SiEntrenO*, se logró integrar varias Tecnologías de Información y elementos de aprendizaje que permiten que los operadores realicen un entrenamiento más efectivo e interactivo.

Los principales aportes que se consideran en este trabajo son:

- A. La adaptación de una arquitectura para la integración de diferentes componentes de la un STI basado en simulación, llamado *SiEntrenO*. Estos componentes son: i) el sistema tutor inteligente, el cual está conformado por el modelo del estudiante, el módulo tutor y la base de conocimientos del dominio del problema; ii) el ambiente de aprendizaje, que se compone de la interfaz, las lecciones de ayuda, los experimentos diseñados y las acciones pedagógicas para los operadores; y iii) el ambiente de entrenamiento virtual que contiene las simulaciones correspondientes para los tres circuitos diseñados en este trabajo de investigación.
- B. Un sistema web integrado que facilita la administración de usuarios y el seguimiento del desempeño de los operadores. Se desarrolló de tal manera que es fácil extender la funcionalidad del ambiente. Por ejemplo, agregar nuevos perfiles de usuarios, añadir nuevas simulaciones, etc. Adicionalmente, el ambiente permite que el operador pueda interactuar con el sistema desde cualquier computadora, ya que todas las funcionalidades de *SiEntrenO* están disponibles vía web.
- C. El uso de un ambiente de simulación en 3D que permite al operador visualizar el circuito de la planta en el que está practicando. La simulación permite también ver a través de los componentes de la planta, que a su vez están compuestos de otros elementos. El modelado en 3D se desarrolló de tal manera que es posible observar gráficamente los cambios que el operador hace en la simulación. Por ejemplo, en la pila del circuito 1 se muestra un indicador para la potencia meta que se le demanda al operador, y se incluye otro indicador gráfico que aumenta o disminuye dinámicamente el nivel de la potencia generada, de acuerdo a las variables seleccionadas por el operador.

- D. La modelación y simplificación de conceptos complejos de termodinámica que rigen el funcionamiento de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado. Debido a que el sistema está orientado a operadores novatos, fue necesario simplificar el funcionamiento de la planta. Esto dio como resultado la modelación de tres circuitos independientes correspondientes a la CTCC.
- E. El diseño de experimentos y simulaciones dinámicas en línea con variables meta, de restricción, de exploración y variables dinámicas que integran la interfaz para la simulación de los tres circuitos, y que permite a los operadores identificar fácilmente los objetivos del experimento y los datos necesarios para completar el ejercicio.
- F. El diseño del STI capaz de inferir, mediante las redes bayesianas y las redes de decisión, el conocimiento que adquiere el operador en función de la interacción con las simulaciones. Se logró una correcta calibración de las redes bayesianas y de decisión, en colaboración con un experto en el dominio, para que el STI asignara las acciones pedagógicas correctas de acuerdo al desempeño del operador. Dependiendo de la acción pedagógica, el STI se encarga de asignar el nivel de dificultad a las siguientes simulaciones que los operadores deben resolver. De esta manera no es necesario que el instructor esté presente durante el entrenamiento del operador. Sin embargo, el instructor puede revisar los detalles de cada simulación que resuelva el operador, así como la inferencia de los conceptos asociados, en caso de que exista la necesidad de que el instructor brinde retroalimentación presencial al operador.

Con todo lo anterior se logró integrar un primer ambiente virtual de entrenamiento de manera exitosa. Adicionalmente, el diseño es lo suficientemente flexible para extender la herramienta *SiEntrenO* con nuevos circuitos para la CTCC, o inclusive, para el desarrollo de nuevos ambientes de aprendizaje basados en simulaciones.

7.2 Trabajo a Futuro

Como se mencionó en este trabajo, el caso de estudio sólo abarca la implementación del STI para el Circuito 1 – Turbina de Vapor, por lo que la implementación de los circuitos 2 (domo) y 3 (deareador) son desarrollos que se pueden continuar en un futuro, aplicando la misma metodología desarrollada en este trabajo.

Otra área de oportunidad que se identificó es el evaluar el impacto del aprendizaje con grupos foco y de control, donde el grupo foco utilice la herramienta *SiEntrenO* junto con las simulaciones y el STI, mientras que el grupo de control sólo tenga acceso a material pedagógico equivalente para cada circuito. De esta manera se podría apreciar el impacto en ganancias de aprendizaje que brinda el uso de *SiEntrenO*.

Otro aspecto a mejorar en un futuro es optimizar los requerimientos para visualizar las simulaciones. Esto es, buscar la forma en que el usuario pueda ingresar al sistema e interactuar inmediatamente con las simulaciones sin necesidad de instalar programas o librerías en la computadora (cliente). Para ello sería necesario evaluar la conveniencia de que las librerías de simulación residan en el servidor.

Finalmente, sería conveniente analizar la factibilidad de poder visualizar el modelado 3D de la planta en dispositivos móviles (tabletas y teléfonos inteligentes), debido al uso cada vez más intensivo de éstos. Para ello sería necesario que el modelado 3D se migrara a otra tecnología compatible con estos dispositivos, por ejemplo, el uso de HTML5 y CSS3.

Capítulo 8

8 Agradecimientos

Esta tesis es parte del trabajo del Grupo de Investigación en *e-Learning* del Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México en colaboración con el proyecto "Modelos Gráficos Probabilistas y sus aplicaciones" número 95185, realizado con apoyo del FONCICYT-CONACYT y la Comunidad Europea. También se recibió el apoyo de una beca de colegiatura de nivel maestría del Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México y una beca de manutención del CONACYT.

Adicionalmente se desea incluir los siguientes agradecimientos:

Al Ing. Jesse Atiba Benjamin Jacobs por su colaboración dentro del modelado en 3D de la planta.

A la Ing. Rosa Atzimba López Landa por su colaboración en la propagación de evidencia en las Redes Bayesianas y en las Redes de Decisión.

Al M.C. Iván Leonardo Pérez Cabrera por su colaboración en la creación de las lecciones de ayuda.

Al Dr. Moisés Alencastre Miranda por su apoyo y tutoría para el desarrollo del modelado en 3D de la planta.

A la Dra. Lourdes Muñoz Gómez por su participación como sinodal en la defensa de grado de esta tesis.

Al Dr. Alberto Reyes Ballesteros, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), por su apoyo durante la fase de investigación del problema del dominio y su participación como sinodal en la defensa de grado de esta tesis.

Al Dr. Pablo Ibarguengoitia, del Instituto de Investigaciones Eléctricas, por su apoyo en las instalaciones del IIE (Cuernavaca, Morelos) durante la fase de investigación del problema del dominio.

Al Dr. Ricardo Gánem Corvera por su colaboración en el modelado físico para el funcionamiento de la planta.

Al Prof. Juan Manuel Reyna por su apoyo durante la fase de evaluación de la herramienta *SiEntrenO*, ya que los dos grupos en los que imparte la materia de "Balance de Energía" fungieron como grupos de prueba.

Referencias

- [1] C. Frasson, T. Mengelle, E. Aimeur y G. Gouardères, «An Actor-Based Architecture for Intelligent Tutoring Systems,» *Third International Conference. ITS'96*, pp. 57-65, 1996.
- [2] R. H. Kaschek, *Intelligent Assistant Systems: Concepts, Techniques and Technologies*, USA: IGI Global, 2006.
- [3] Y.-g. Ma, J. Ma, J. Li y P. Ran, «The Simulator Operation Instruction System for Simulation,» *System Simulation and Scientific Computing*, pp. 359 - 362, 2008.
- [4] Y. Matsubara y T. Yamasaki, «VR-based Interactive Learning Environment for Power Plant Operator,» 2002.
- [5] J. El-Chaar, C. Boer, P. Pedrazzoli, S. Mazzola y G. Dal Maso, «Interactive 3D Virtual Environments for Industrial,» *Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)*, 2011.
- [6] A. Angelov y Z. Styczynski, «Computer-aided 3D Virtual Training in Power,» *Power Engineering Society General Meeting*, 2007.
- [7] A. Reyes, P. Ibarquengoytia, F. Elizalde, L. Sánchez y A. Nava, «ASISTO: An intelligent assistant system for power plant operation and training,» de *ISAP 2011*, Crete Island, Greece, 2011.
- [8] A. Nava y A. Reyes, *Manual para Simulador de Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado v1.1*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010.
- [9] J. Self, «The defining characteristics of intelligent tutoring systems research: ITSs care, precisely,» *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, vol. 10, nº 3-4, p. 350–364, 1999.
- [10] H. Nwana, «Intelligent Tutoring Systems: An Overview,» *Artificial Intelligence Review*, 1990.
- [11] K. VanLehn, «The behavior of tutoring systems,» *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, vol. 16, nº 3, Agosto 2006.
- [12] M. Mayo y A. Mitrovic, «Optimising ITS behaviour with bayesian networks and decision theory,» *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 2001.

- [13] J. Noguez y L. Neri, «TALENTOTEC: Gana Cátedra de e-Learning premios de innovación educativa,» 29 Febrero 2012. [En línea]. Available: <http://talentotec.ccm.itesm.mx/?p=3576>. [Último acceso: 29 Marzo 2012].
- [14] A. Lozano, *Estilos de Aprendizaje y Enseanza. Un panorama de la estadística educativa*, México: Editorial Trillas, 2003.
- [15] W. Meng y H. Xian-Sheng, «Active Learning in Multimedia Annotation and Retrieval: A Survey,» *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, vol. 2, n° 2, 2011.
- [16] F. Martínez, J. Domínguez y E. De Santa Ana, «Uso del Ordenador en la Enseñanza de la Física en Bachillerato,» *Enseñanza de las Ciencias*, 2005.
- [17] S. Russell y P. Norving, *Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno*, Prentice Hall, 2004.
- [18] C. Carmona, G. Castillo y E. Millan, «Designing a Dynamic Bayesian Network for Modeling Students' Learning Styles,» *Advanced Learning Technologies*, pp. 346 - 350, Julio 2008.
- [19] J. Noguez y E. Sucar, «A semi-open learning environment for virtual laboratories,» *Fourth Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICAI)*, pp. 1185-1194, 2005.
- [20] J. Noguez y E. Sucar, «Intelligent virtual laboratory and project oriented learning for teaching mobile robotics,» *International Journal of Engineering Education*, vol. 22, n° 4, pp. 743-757, 2006.
- [21] J. Noguez, L. E. Sucar y E. Espinosa, «A Probabilistic Relational Student Model for Virtual Laboratories,» *Lectures Notes in Artificial Intelligence*, pp. 303-308, Junio 2007.
- [22] H. J. Perry, «Manual del Ingeniero Químico. Tomo II,» 1981, pp. 2613-2618.
- [23] J. Jubin y D. Chisnell, *Handbook of Usability Testing, How to Plan, Design and Conduct Effective Test*. 2 ed, Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing Inc., 2008.
- [24] F. Sánchez, *Psicología Social*, Madrid: Mc Graw Hill, 1998.
- [25] R. R. Hake, «Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses,» *Am. J. Phys.*, vol. 66, n° 1, pp. 64-74, 1988.

- [26] J. Pye, 24 Enero 2010. [En línea]. Available: <http://freesteam.sourceforge.net/>. [Último acceso: 15 Marzo 2012].
- [27] «Proyecto Elvira,» 10 Noviembre 2005. [En línea]. Available: <http://www.ia.uned.es/~elvira/>. [Último acceso: 19 Abril 2012].
- [28] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach* (6th Edition), USA: Mcgraw Hill, 2007.
- [29] M. S. a. P. Clements, «The golden age of software architecture,» *IEEE Software*, vol. 23, n° 2, pp. 31 - 39, 2006.
- [30] V. D. a. A. Harrer, «Software patterns in ITS architectures,» *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, vol. 15, n° 2, pp. 63-94, Abril 2005.
- [31] N. Hyacinth, «Intelligent Tutoring Systems: An Overview,» *Artificial Intelligence Review*, pp. 251-277, 1990.
- [32] M. M. Martínez, *Sistema de Control Supervisorio Generalizado Convencional e Inteligente para Centrales de Generación de Ciclo Combinado*, Cuernavaca, Morelos: Tesis de Maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), 2004.
- [33] M. J. Moran y H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th ed., USA: Wiley, 2003.
- [34] S. R. a. P. Norving, *Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno*, España: Prentice Hall, 2004.
- [35] D. Shreiner, *OpenGL® Reference Manual: The Official Reference Document to OpenGL, Version 1.4*, 4th ed., USA: Addison-Wesley, 2004.
- [36] B. P. Woolf, *Building Intelligent Interactive Tutors: Student-centered strategies for revolutionizing e-learning*, USA: Morgan Kaufmann, 2009.

Apéndice A Modelado en 3D (Turbina de Vapor)

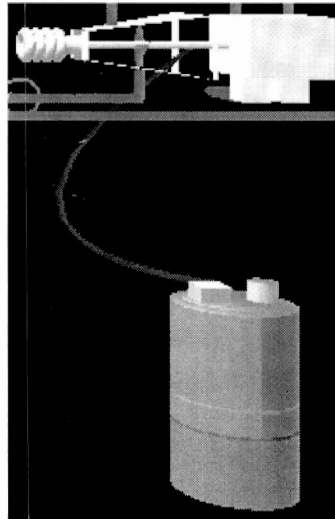
La representación en 3D de la planta eléctrica de ciclo combinado (T.V.) se realizó en el lenguaje de programación *C* con las librerías de *OpenGL* incluyendo todos los elementos principales de la planta, materiales, iluminación, manejo de cámaras y la interacción. Para integrar el código en el *applet* de la simulación fue necesario pasar el código a lenguaje Java mediante *JOGL*, de esta manera el modelo en 3D de la planta puede ser visualizado desde internet. Es importante señalar que las simulaciones (diferentes circuitos) en 3D de la planta sólo se pueden visualizar en el sistema operativo *Windows (XP, Vista, 7)*, y además es necesario contar con el *JRE* de *Java* instalado y un navegador web (*Internet Explorer, Firefox, Chrome*).

A continuación se explica cómo se realizó la modelación de los tres circuitos a detalle, indicando las funciones y librerías utilizadas para su desarrollo.



Circuito 1 – Turbina de Vapor

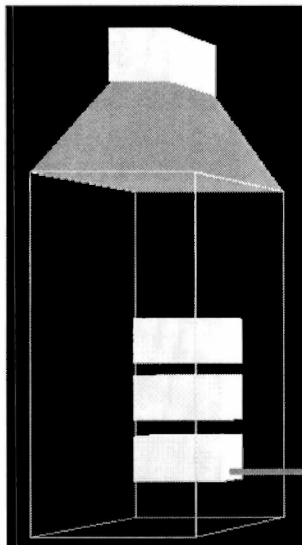
Cada figura presente en el modelo 3D se colocó en una lista para no ocupar mucha memoria al momento de la ejecución, ya que las listas solamente se ejecutan una vez. Los tubos fueron hechos utilizando cilindros con la función *gluCylinder()* de la librería *glut*. Se utilizó una curva de Bézier para simular el ventilador presente en el condensador y también para dibujar el cable del condensador como nos muestra el diagrama siguiente.



Condensador junto con la turbina, el ventilador y la pila de energía generada.

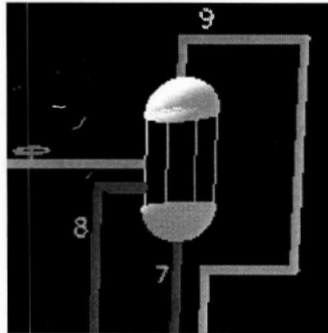
Las funciones de los tubos se encargan de poner los tubos en sus lugares apropiados (utilizando el *glTranslate()* y *glRotate()*) y con sus longitudes apropiadas (utilizando *glScale()*).

Tanto el recuperador de calor como los contenedores dentro de él fueron hechos mediante cubos y rectángulos. El economizador, evaporador de alta presión y sobrecalentador fueron hechos con la función *glSolidCube()*. Los rectángulos fueron utilizados para simular el cuello del recuperador de calor con la función *GL_QUADS()*. El mismo proceso fue repetido para crear el recuperador de calor en forma *wired* (alambre), pero con las funciones de *wire* en *glut* en vez de *solid*.



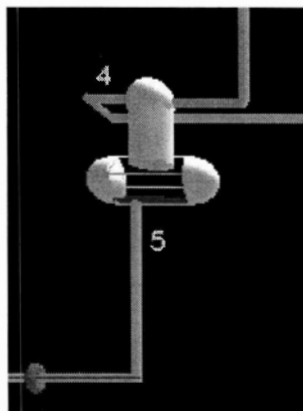
Recuperador de calor

El domo fue hecho utilizando esferas (*glutSolidSphere()*) y cilindros (*glutSolidCylinder()*). El domo ocupa unos *glClipPlane()* adicionales para cortar las esferas a la mitad, de esta manera se ve mas real. Se utilizan cilindros para simular el nivel de agua.



Domo

El deaerador fue creado con el uso de las mismas funciones que el domo.



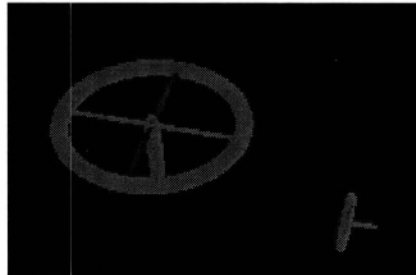
Deaerador

El condensador fue simulado con el uso de cubos para simular el cuerpo y la base, y un cilindro fue puesto para conectar el condensador con el ventilador y la turbina. El generador eléctrico está compuesto de varias círculos (*glutSolidTorus()*) comprimidos colocados en varios cilindros de diferentes tamaños.

Para simular la potencia eléctrica generada por la turbina de vapor se modeló una batería, la cual fue creada con varios cilindros, uno para el cuerpo y otro encima del cuerpo para simular el nivel de potencia generado (color rojo). También utiliza un cilindro verde muy delgado para marcar la meta de potencia que se tiene que alcanzar. Así mismo, para los polos se utiliza un cilindro para el polo izquierdo y un cubo para el polo derecho. La función *glBlendFunc()* fue utilizada para que la batería muestre el efecto de transparencia.

Todas las válvulas de la escena fueron creadas mediante cilindros de diferentes tamaños dentro de un toroide (*glutSolidTorus()*).

Adicionalmente se consideró el manejo de la cámara con el uso de teclas para realizar las diferentes funcionalidades como: acercamiento, alejamiento y trasladar o girar el escenario. Estas funciones se implementaron dentro de la función *display()* modificando los valores dinámicamente de algunas variables en las funciones de *glRotate()* y *gluLookAt()*.



Representación de las válvulas en el sistema

Para la iluminación de la escena se hace uso de una luz con componentes ambiental y otra luz difusa. La luz se encuentra en la parte trasera-superior de la escena para lograr una iluminación más parecida a la realidad. Posteriormente se consideraron los materiales de las figuras presentes en la escena: tubos, maquinas y válvulas. Para generar colores diferentes, a cada figura se le asignaron diferentes materiales.

Se utilizaron los efectos *wired* y *solid* para los principales componentes de la planta: recuperador de calor, domo, deareador y turbina de vapor. De esta manera se pueden ver los objetos que componen a su vez a estos componentes principales. Por ejemplo, en el caso del domo y el deareador, se puede ver su nivel del agua.

Posteriormente, el código fue exportado a *JOGL*. Para realizar este paso utilizamos las librerías de *javax* con *opengl* y de *jogamp* con *opengl*.

Apéndice B Administración de Usuarios

El Sistema de Administración de Usuarios cuenta con 5 tipos de usuarios, los cuales se describen a continuación.

Administrador

- Registrar instituciones, divisiones y departamentos.
- Registrar usuarios de cualquier tipo.

Directivo

- Revisar el avance de los operadores de cualquier grupo.

Supervisor

- Alta/Baja/Cambios de instructores
- Alta/Baja/Cambios de grupos (con instructor, materia y periodo).
- Alta/Baja/Cambios de materias.
- Alta/Baja/Cambios de periodos.

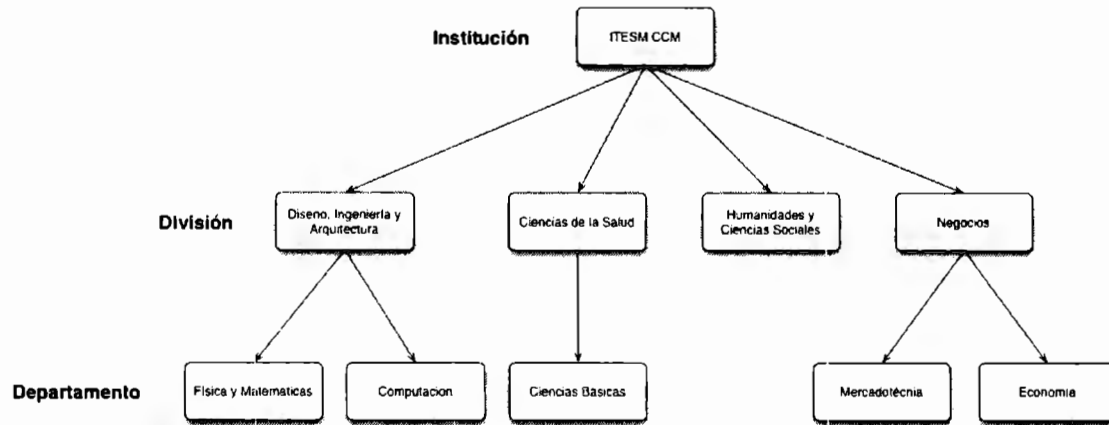
Instructor

- Seleccionar experimentos para su grupo.
- Autoriza operadores.
- Dar de alta ayudas y lecturas.
- Alta/Baja/Cambios de operadores

Operador

- Darse de alta (su cuenta está deshabilitada hasta que lo autorice un usuario de mayor nivel).
- Modificar su información
- Consultar su información
- Realizar experimentos
- Ver sus grupos, materias y periodos.

Cada uno de estos usuarios se puede registrar de acuerdo a su ubicación dentro de la institución a la pertenecen. La jerarquía es institución, división y departamento; cabe mencionar que es necesario registrar primero cada una de estas categorías. Cualquier usuario se puede registrar a cualquier nivel del árbol jerárquico, y cada una de estas categorías debe tener la siguiente información. Un ejemplo de jerarquía de una institución se muestra en la siguiente figura.



Parte de la jerarquía del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores Campus Ciudad de México

Institución

- Nombre
- Dirección
- Teléfono
- Contacto

División

- Nombre
- Teléfono
- Contacto
- Institución a la que pertenece

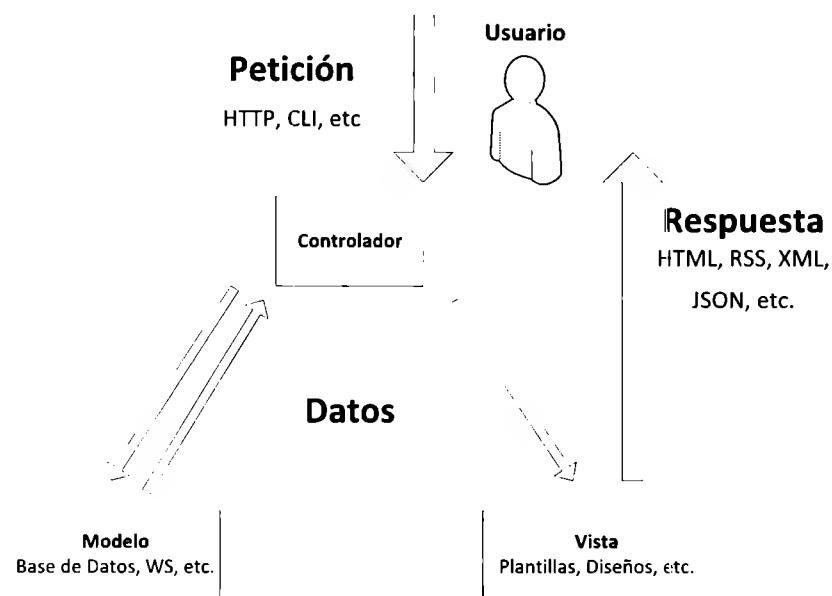
Departamento

- Nombre
- Teléfono
- Contacto
- Institución a la que pertenece

En el sistema se pueden crear grupos, a los que se les asignan operadores. Los operadores cuentan con materia y un periodo. A su vez, cada materia tiene un conjunto de temas, los temas cuentan con subtemas y, por último, cada subtema cuenta con sus respectivos conceptos.

Apéndice C Diseño del ambiente web

El sistema de administración de usuarios se realizó con la arquitectura Modelo Vista Controlador (MVC), que se ilustra a continuación.



Arquitectura MVC

Se utilizó el lenguaje de programación *Java* para ambiente web por medio de *Java Server Pages (JSP)*. También se hizo uso del marco de trabajo *Spring 2.6* y *Spring Security 2.0.5* para hacer más robusto el ambiente web; y el segundo para tener una mejor seguridad en el acceso al sistema. Como base de datos se utilizó *MySQL 5.1.51*. Finalmente para servidor web se usó *Apache Tomcat 6.0.26*. Como se muestra en el siguiente diagrama de despliegue.

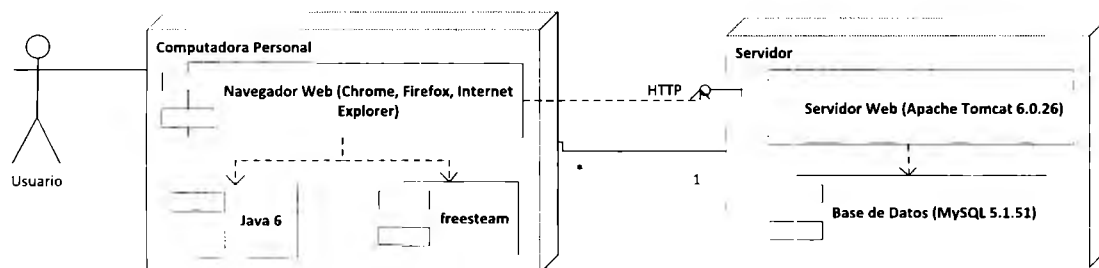
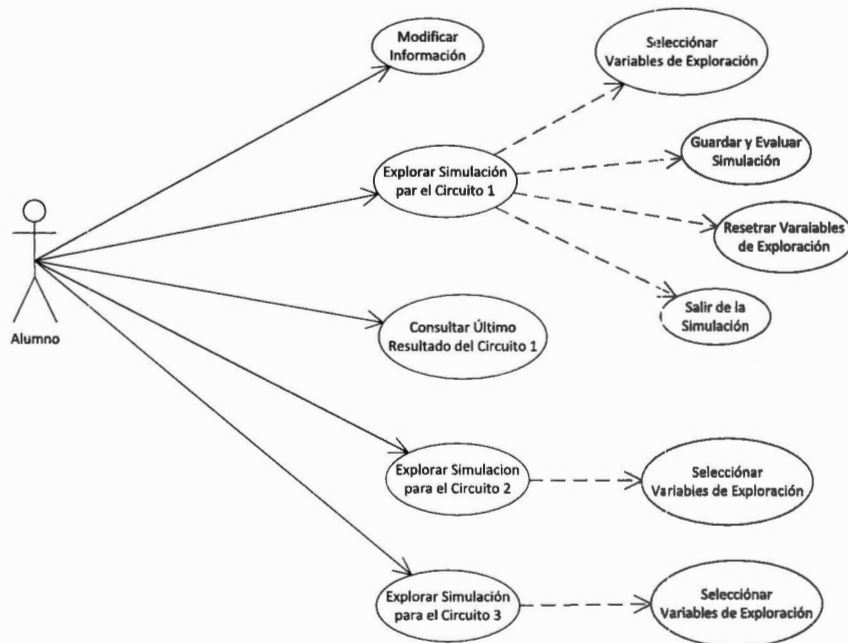


Diagrama de despliegue de SiEntrenO

Como parte del diseño de la arquitectura también se muestra a continuación el diagrama de uso y de componentes para el operador.



Caso de uso para el operador

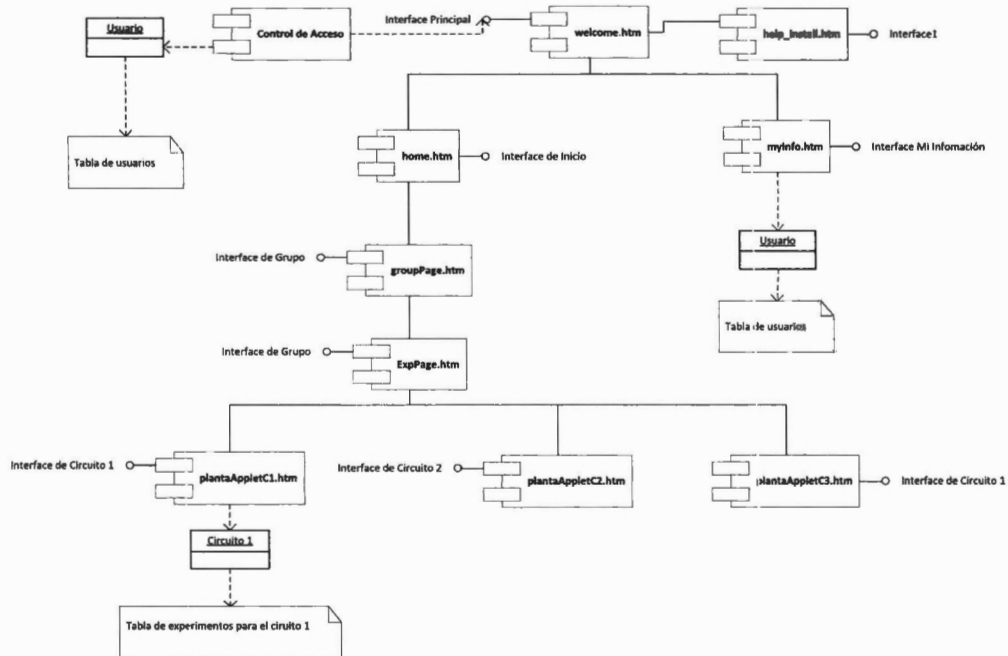


Diagrama de componentes para el operador

Apéndice D Manual de usuario (fase de pruebas)

1. Entrar a la página:

<http://elearning2.ccm.itesm.mx:8080/foncicytapp>

La imagen muestra la página de inicio de *SiEntrenO*. Se debe introducir el nombre de usuario y contraseña proporcionado.

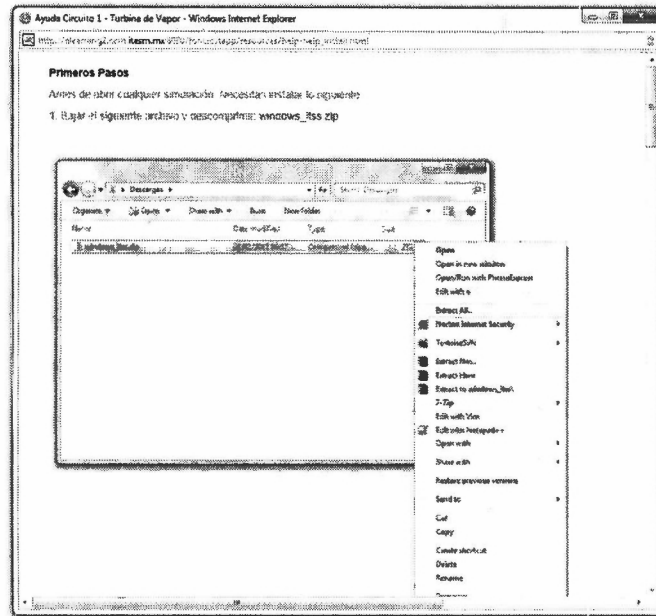


2. Una vez dentro del sistema aparece la pantalla de bienvenida. Antes de trabajar con la simulación se debe instalar el software necesario para correr las simulaciones; para ello se debe dar clic en **Primeros Pasos**.

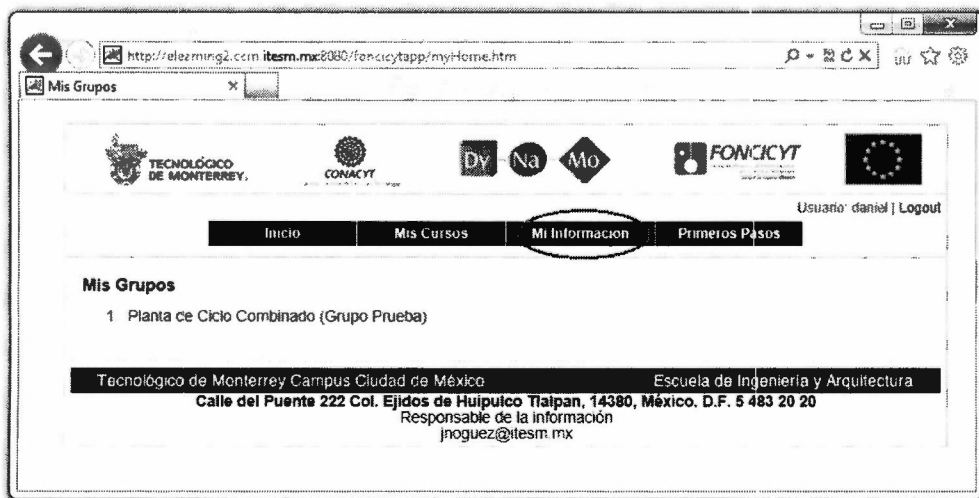
NOTA: Las simulaciones sólo corren en el sistema operativo *Windows (XP, Vista, 7)*, es necesario contar con el *JRE de Java*, y se puede utilizar el navegador web de preferencia (*Internet Explorer, Firefox, Chrome*).



3. La imagen siguiente muestra la página de **Primeros Pasos**; se deben seguir las instrucciones para instalar el software.

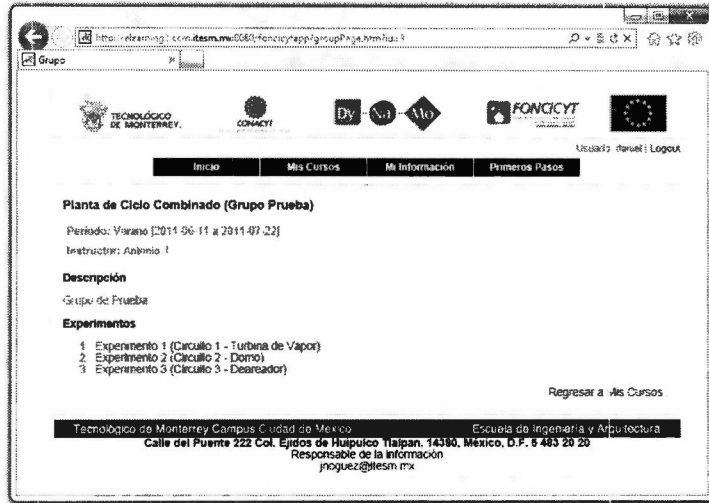


4. Posteriormente se debe dar clic en **Mis Cursos** (Menú Principal), ahí aparecen los grupos a los que el usuario está asignado. A continuación se debe dar clic en el grupo **“Planta de Ciclo Combinado (Grupo de Prueba)”**.



5. Ya en la página del grupo se muestra información como: Nombre del Grupo, Periodo, Instructor, Descripción, y los circuitos que están habilitados para tu grupo. En el caso mostrado en la pantalla siguiente están habilitados todos los circuitos (1, 2 y 3). El caso de pruebas sólo se realizará con el **Experimento 1 (Circuito 1 – Turbina de Vapor)**, ya que es el único que esta completo, es decir, que tiene integrado el tutor inteligente. Los demás circuitos se pueden visualizar y cambiar los valores de las variables de exploración para ver los valores que resultaron para las variables calculadas y meta (están sujetos a cambios

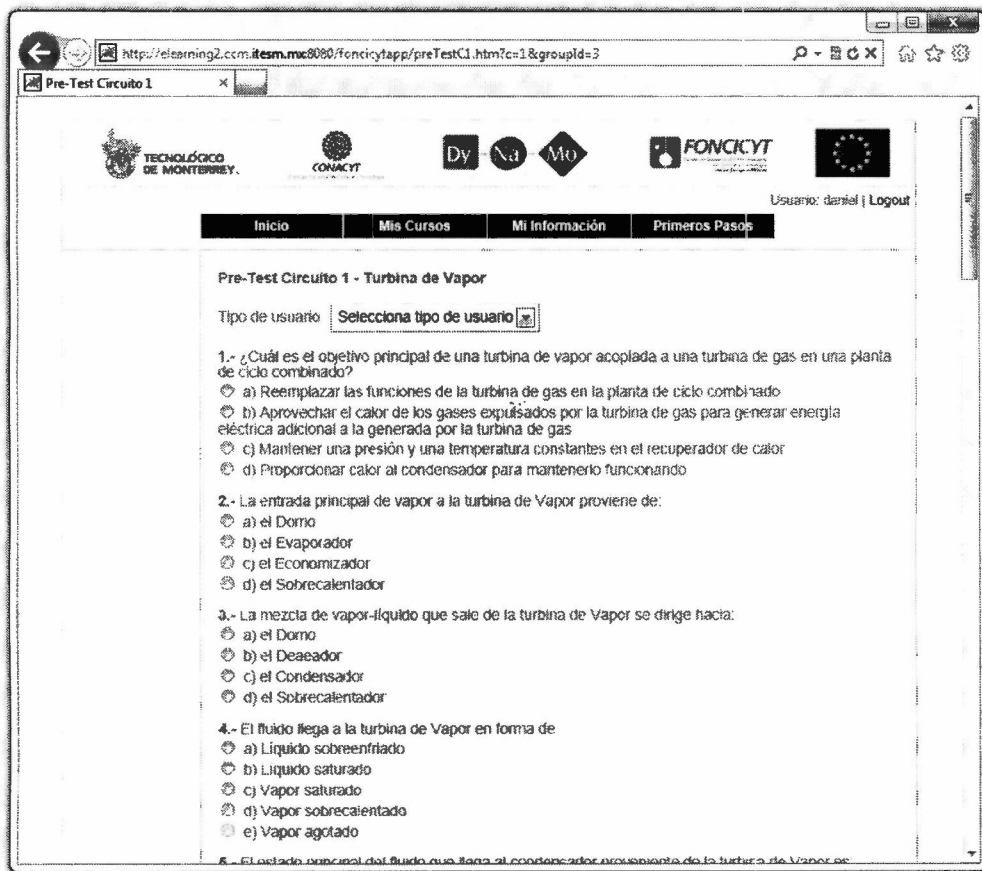
todavía), pero no tienen integrado todavía el tutor inteligente y por lo tanto la opción de **Guardar y Evaluar** no está habilitada, para estos circuitos.



- Una vez dando clic en **Experimento 1 (Circuito 1 – Turbina de Vapor)**, se presenta la descripción del problema a resolver. La palabra **META** se refiere a la potencia meta que se pedirá alcanzar en el experimento más adelante. Del lado izquierdo se muestra el menú correspondiente al experimento 1.



- Antes de realizar la simulación se debe contestar el **Pre-Test**. El tipo de usuario, que se debe elegir es **Profesor** (Alumno es para pruebas con grupos). Se deben contestar todas las preguntas y hacer clic en guardar; el sistema mostrará el número de respuestas correctas.



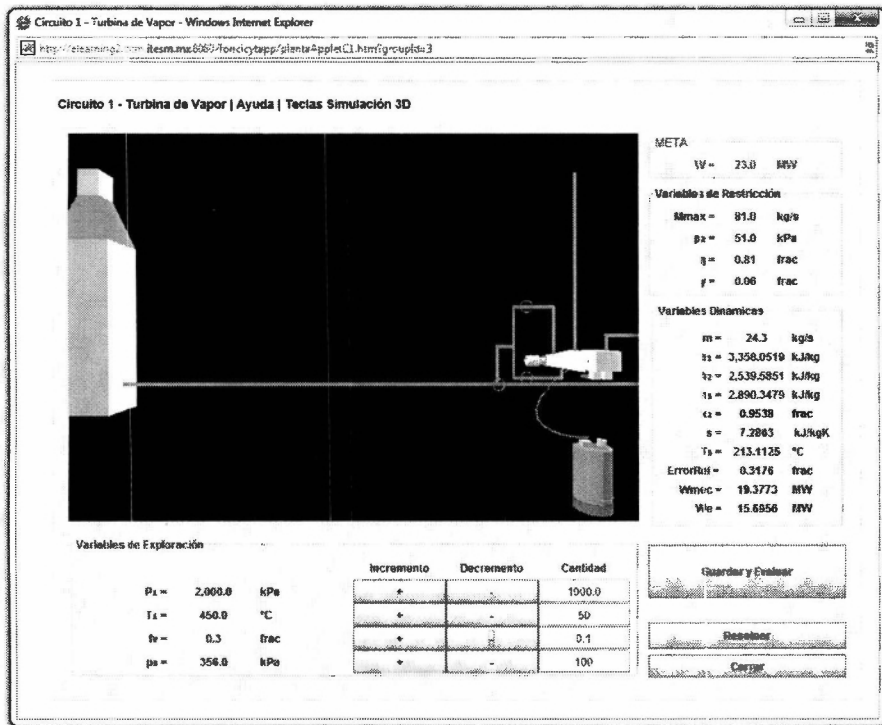
8. Una vez terminado el **Pre-Test** se puede pasar a la **Simulación** (opción en el menú del lado derecho). En la siguiente imagen podemos ver la simulación correspondiente al primer circuito. A un lado del título se encuentran dos ligas:
- Ayuda:** Contiene información acerca del circuito y las variables involucradas.
 - Teclas Simulación 3D:** Contiene información de cómo manipular la escena en 3D del circuito 1.

Por otro lado se encuentran las diferentes partes del experimento:

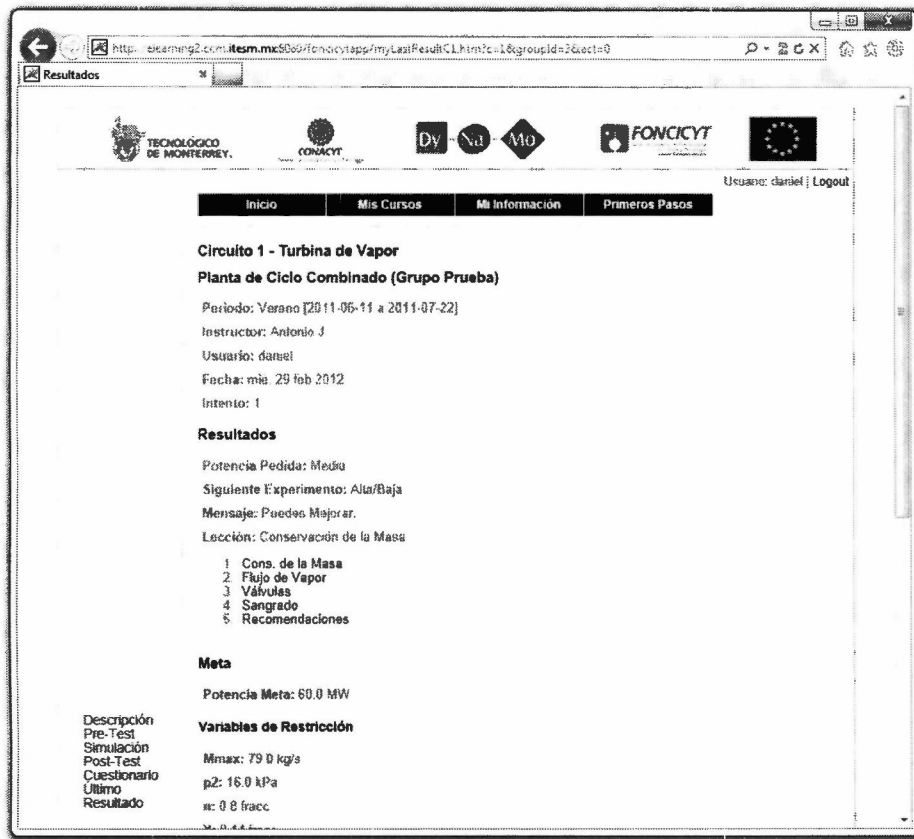
- Simulación 3D:** El primer circuito modelado en 3D.
- META:** La potencia meta que se te pide alcanzar para el experimento en curso.
- Variables de Restricción:** Las variables que el sistema da como restricción para este experimento (fijas, para cada intento). El sistema las genera aleatoriamente dentro de un rango específico.
- Variables Dinámicas:** Estas variables se calculan en tiempo real dependiendo de las Variables de Exploración y las Variables de Restricción.
- Variables de Exploración:** Variables que se pueden manipular para alcanzar la potencia meta que se está pidiendo. En el campo de **Cantidad** se debe indicar un número, y esa es la cantidad en la que se **Incrementará (+)** o **Disminuirá (-)** la variable.

Por último tenemos tres botones:

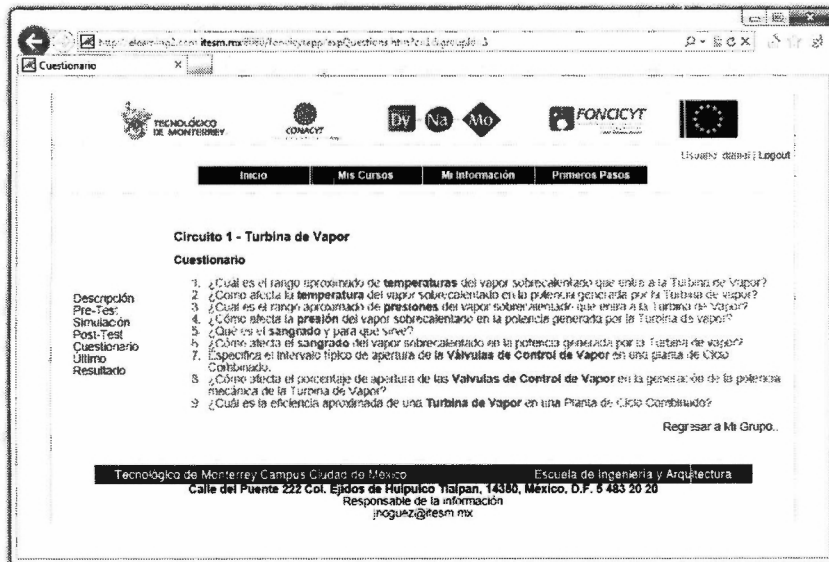
- Guardar y Evaluar:** Como su nombre lo indica, Guarda y Evalúa los valores de las variables del experimento. Este botón se utiliza hasta que el usuario esté seguro de que ha concluido el experimento actual.
- Reinicializar (V. Exp):** Regresa las **Variables de Exploración** a sus valores iniciales.
- Cerrar:** Cierra la simulación. Los cambios no se guardan, pero la próxima vez que se inicie de nuevo la simulación, el sistema cargará los valores del último experimento que se realizó.



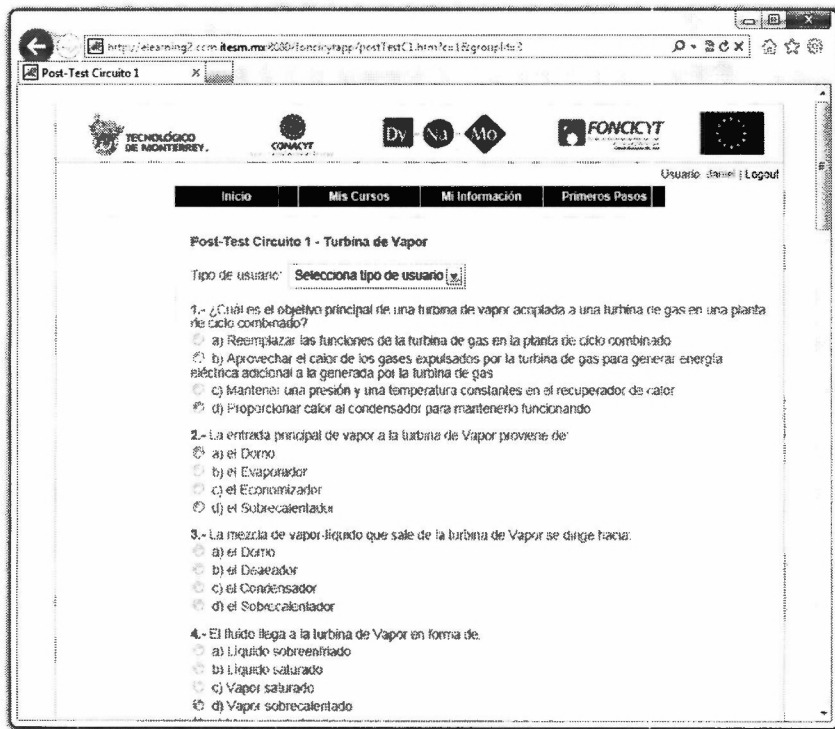
- Una vez dando clic en **Guardar y Evaluar**, se puede dar clic en **Último Resultado** para consultar la evaluación del último experimento. En esta página se puede encontrar información como:
 - Información del experimento:** Fecha en que se realizó el experimento, y el número de intentos realizados hasta la fecha.
 - Resultados:** La potencia que se pidió, la potencia del siguiente experimento, un mensaje y las lecciones que el tutor inteligente proporciona dependiendo del desempeño del operador en el experimento.
 - Todos los valores del experimento realizado al momento de guardarlo.**



10. En la liga de **Cuestionario** se encuentran preguntas de tipo reflexión para el alumno ó operador.



11. A continuación, se debe responder el **Post-Test**. Se debe elegir **Profesor** como **Tipo de Usuario** (Alumno es para pruebas con grupos).



12. Por último, se debe responder el **Cuestionario de Usabilidad** (Apéndice H) dando clic en la siguiente liga:

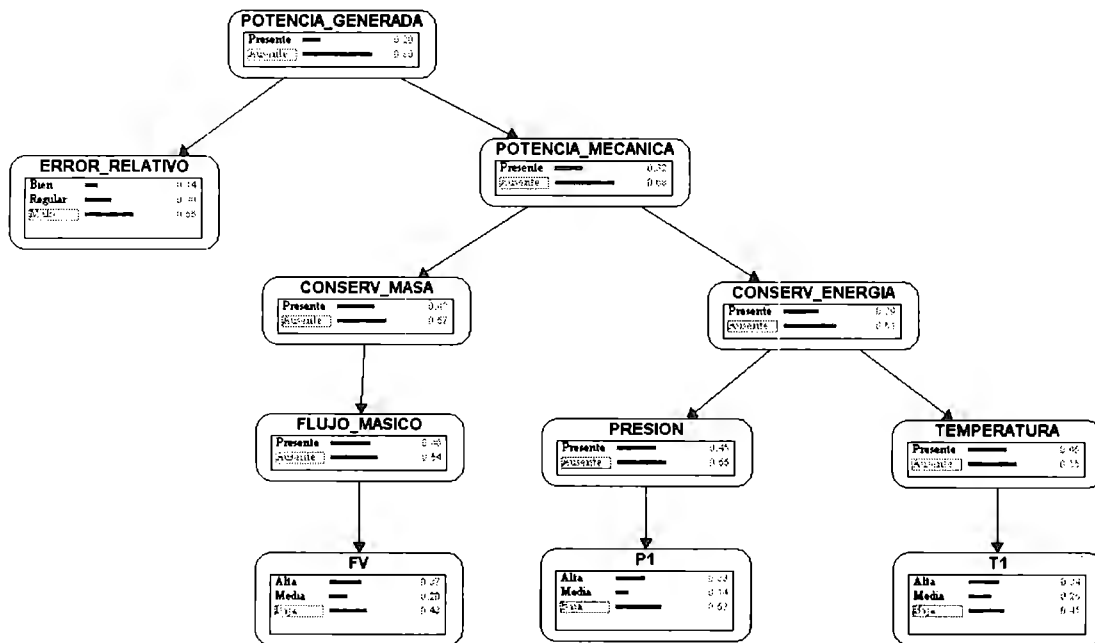
<http://www.surveymonkey.com/s/H9MW3X7>

Cualquier comentario es bienvenido.

Gracias.

Apéndice E Redes Bayesianas – T.V.

Red Bayesiana para potencia alta del primer circuito



Tablas de relación probabilística (potencia alta)

Nodo: POTENCIA_GENERADA

Presente	0.2
Ausente	0.8

Nodo: ERROR_RELATIVO

POTENCIA_GENERADA	Presente	Ausente
Bien	0.4	0.08
Regular	0.5	0.25
Malo	0.1	0.67

Nodo: POTENCIA_MECANICA

POTENCIA_GENERADA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: CONSERV_MASA

POTENCIA_MECANICA	Presente	Ausente
Presente	0.7	0.3
Ausente	0.3	0.7

Nodo: CONSERV_ENERGIA

POTENCIA_MECANICA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: FLUJO_MASICO

CONSERV_MASA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: PRESION

CONSERV_ENERGIA	Presente	Ausente
Presente	0.75	0.25
Ausente	0.25	0.75

Nodo: TEMPERATURA

CONSERV_ENERGIA	Presente	Ausente
Presente	0.75	0.25
Ausente	0.25	0.75

Nodo: FV

FLUJO_MASICO	Presente	Ausente
--------------	----------	---------

Nodo: P1

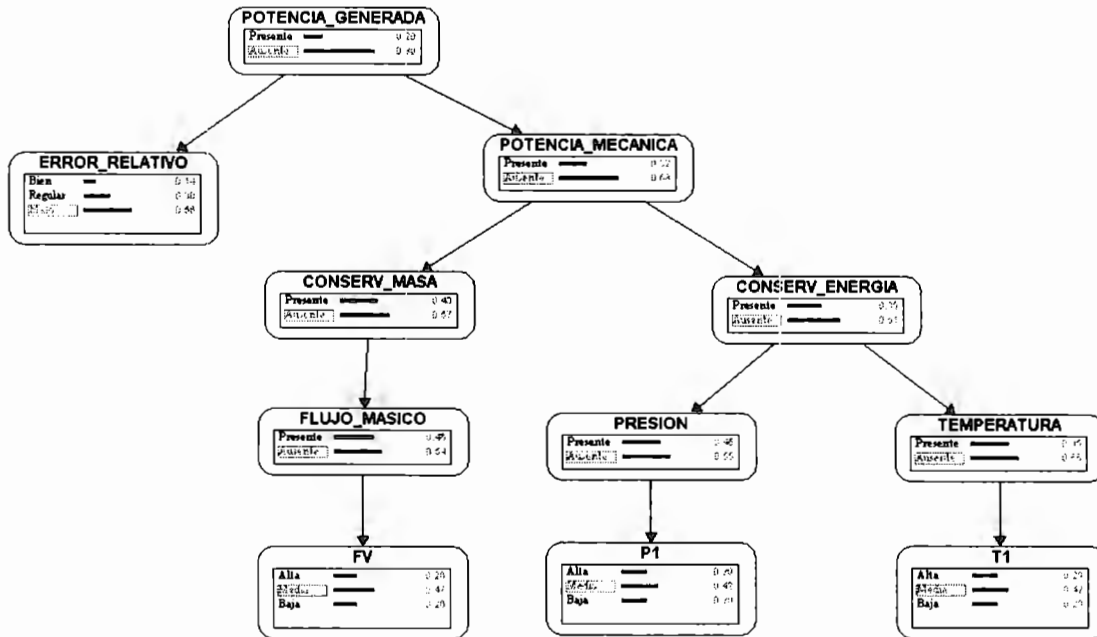
PRESION	Presente	Ausente
---------	----------	---------

Presente	0.7	0.1	Presente	0.75	0
Ausente	0.2	0.2	Ausente	0.2	0.1
Ausente	0.1	0.7	Ausente	0.05	0.9

Nodo: T1

TEMPERATURA	Presente	Ausente
Presente	0.7	0.05
Ausente	0.25	0.25
Ausente	0.05	0.7

Red Bayesiana para potencia media del primer circuito



Tablas de relación probabilística (potencia media)

Nodo: POTENCIA_GENERADA

Presente	0.2
Ausente	0.8

Nodo: ERROR_RELATIVO

POTENCIA_GENERADA	Presente	Ausente
Bien	0.4	0.08
Regular	0.5	0.25
Malo	0.1	0.67

Nodo: POTENCIA_MECANICA

POTENCIA_GENERADA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: CONSERV_MASA

POTENCIA_MECANICA	Presente	Ausente
Presente	0.7	0.3
Ausente	0.3	0.7

Nodo: CONSERV_ENERGIA

POTENCIA_MECANICA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: FLUJO_MASICO

CONSERV_MASA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: PRESION

CONSERV_ENERGIA	Presente	Ausente
Presente	0.75	0.25
Ausente	0.25	0.75

Nodo: TEMPERATURA

CONSERV_ENERGIA	Presente	Ausente
Presente	0.75	0.25
Ausente	0.25	0.75

Nodo: FV

FLUJO_MASICO	Presente	Ausente
Presente	0.1	0.4
Ausente	0.8	0.2
Ausente	0.1	0.4

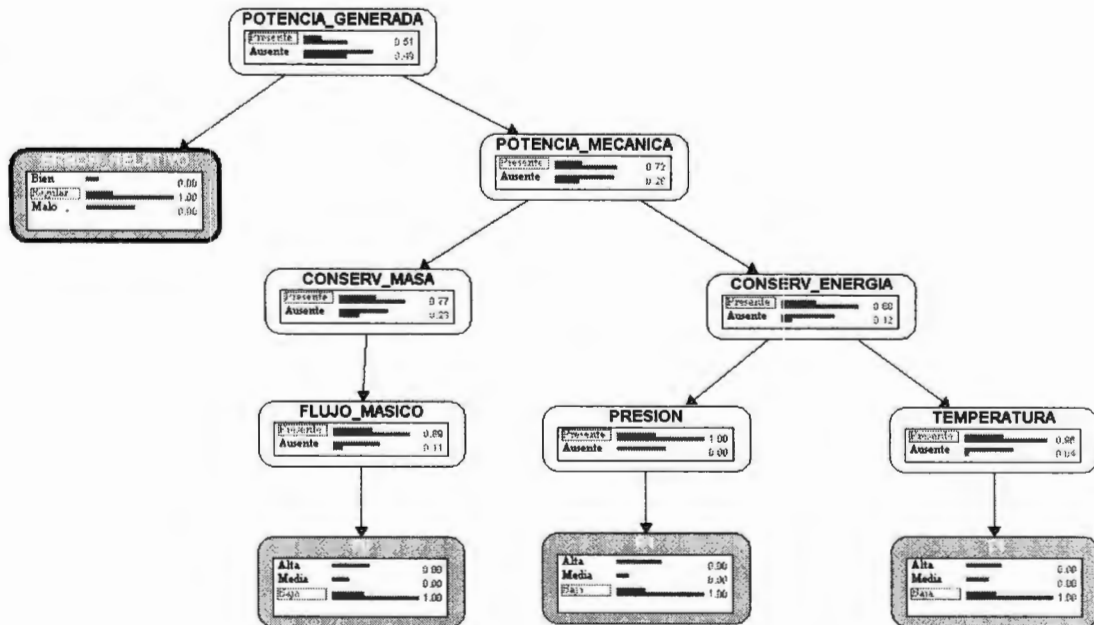
Nodo: P1

PRESION	Presente	Ausente
Presente	0.15	0.4
Ausente	0.7	0.2
Ausente	0.15	0.4

Nodo: T1

TEMPERATURA	Presente	Ausente
Presente	0.15	0.4
Ausente	0.7	0.2
Ausente	0.15	0.4

Red Bayesiana para potencia baja del primer circuito



Tablas de relación probabilística (potencia baja)

Nodo: POTENCIA_GENERADA

Presente	0.2
Ausente	0.8

Nodo: ERROR_RELATIVO

POTENCIA_GENERADA	Presente	Ausente
Bien	0.4	0.08
Regular	0.5	0.25

Malo	0.1	0.67
------	-----	------

Nodo: POTENCIA_MECANICA

POTENCIA_GENERADA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: CONSERV_MASA

POTENCIA_MECANICA	Presente	Ausente
Presente	0.7	0.3
Ausente	0.3	0.7

Nodo: CONSERV_ENERGIA

POTENCIA_MECANICA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: FLUJO_MASICO

CONSERV_MASA	Presente	Ausente
Presente	0.8	0.2
Ausente	0.2	0.8

Nodo: PRESION

CONSERV_ENERGIA	Presente	Ausente
Presente	0.75	0.25
Ausente	0.25	0.75

Nodo: TEMPERATURA

CONSERV_ENERGIA	Presente	Ausente
Presente	0.75	0.25
Ausente	0.25	0.75

Nodo: FV

FLUJO_MASICO	Presente	Ausente
Presente	0.1	0.7
Ausente	0.2	0.2
Ausente	0.7	0.1

Nodo: P1

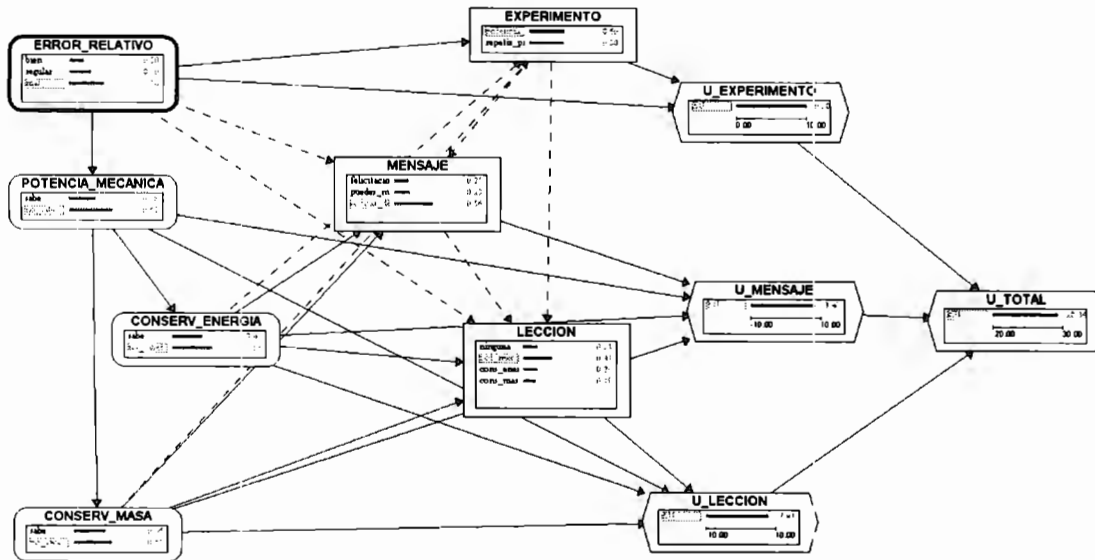
PRESION	Presente	Ausente
Presente	0.05	0.9
Ausente	0.2	0.1
Ausente	0.75	0

Nodo: T1

TEMPERATURA	Presente	Ausente
Presente	0.05	0.7
Ausente	0.25	0.25
Ausente	0.7	0.05

Apéndice F Redes de Decisión – T.V. (Circuito 1)

Red de Decisión para potencia alta/baja del primer circuito



Tablas de relación probabilística para nodos aleatorios (potencia alta/baja)

Nodo: ERROR RELATIVO

bien	0.2
regular	0.3
mal	0.5

Nodo: POTENCIA MECANICA

ERROR RELATIVO	bien	regular	mal
sabe	0.95	0.55	0.05
no sabe	0.05	0.45	0.95

Nodo: CONSERV ENERGIA

POTENCIA MECANICA	sabe	no sabe
sabe	0.8	0.2
no_sabe	0.2	0.8

Nodo: CONSERV MASA

POTENCIA MECANICA	sabe	no sabe
sabe	0.7	0.3
no sabe	0.3	0.7

Tablas de acciones para nodos de decisión (potencia alta/baja)

Nodo: EXPERIMENTO

Decisión	Nombre
1	potencia media
2	repetir problema

Nodo: MENSAJE

Decisión	Nombre
1	felicitaciones
2	puedes mejorar
3	revisar de nuevo

Nodo: LECCION

Decisión	Nombre
1	ninguna
2	pot mecanica
3	cons energia
4	cons masa

Tablas utilidad (potencia alta/baja)

Nodo: U EXPERIMENTO

ERROR RELATIVO	bien	bien	regular	regular	mal
EXPERIMENTO	potencia media	repetir problema	potencia media	repetir problema	potencia media
U EXPERIMENTO	10	0	10	0	0
	mal				
	repetir problema				
	10				

Nodo: U MENSAJE

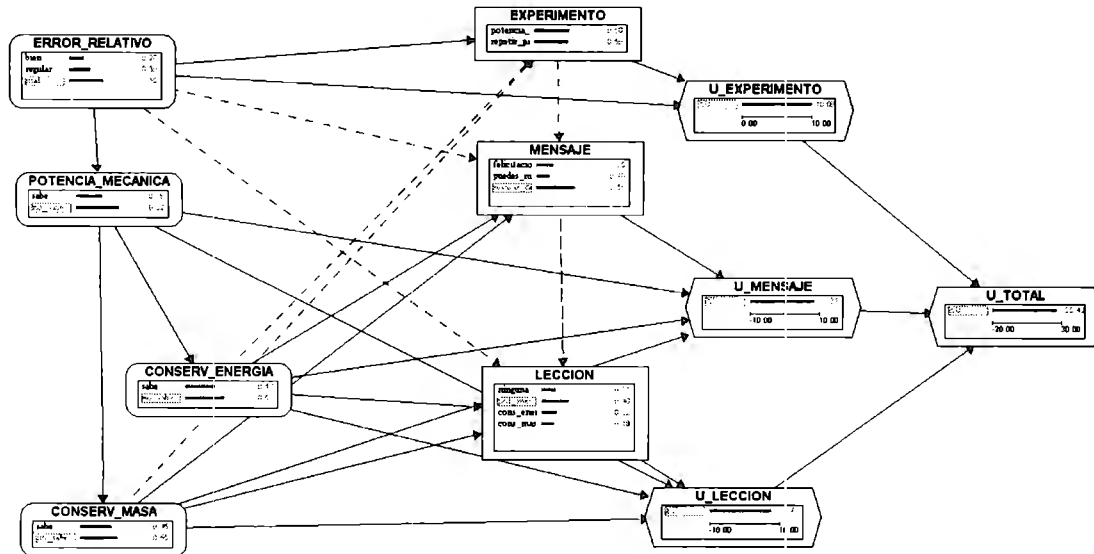
CONSERV ENERGIA	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
CONSERV MASA	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
MENSAJE	felicitaciones	felicitaciones	puedes mejorar	puedes mejorar	revisar de nuevo
POTENCIA MECANICA	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
U MENSAJE	10	0	-5	8	-10
	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
	sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	revisar de nuevo	felicitaciones	felicitaciones	puedes mejorar	puedes mejorar
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	0	4	-6	10	5
	sabe	sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	no sabe	no sabe	sabe	sabe	sabe
	revisar de nuevo	revisar de nuevo	felicitaciones	felicitaciones	puedes mejorar
	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
	0	8	0	-8	6
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	sabe	sabe	sabe	no sabe	no sabe
	puedes mejorar	revisar de nuevo	revisar de nuevo	felicitaciones	felicitaciones
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	0	-6	8	-8	-10
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	
	puedes mejorar	puedes mejorar	revisar de nuevo	revisar de nuevo	
	sabe	no sabe	sabe	no sabe	
	-6	4	6	10	

Nodo: U LECCION

CONSERV ENERGIA	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
CONSERV MASA	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe

LECCION	ninguna	ninguna	pot mecanica	pot mecanica	cons energia
POTENCIA MECANICA	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
U LECCION	10	-8	-10	5	-10
	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
	sabe	sabe	sabe	no sabe	no sabe
	cons energia	cons masa	cons masa	ninguna	ninguna
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	-8	-10	-8	-10	-10
	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	pot mecanica	pot mecanica	cons energia	cons energia	cons masa
	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
	0	2	-8	-10	0
	sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	no sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
	cons masa	ninguna	ninguna	pot mecanica	pot mecanica
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	10	-8	-10	0	0
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	sabe	sabe	sabe	sabe	no sabe
	cons energia	cons energia	cons masa	cons masa	ninguna
	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
	10	6	-5	-10	-10
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	ninguna	pot mecanica	pot mecanica	cons energia	cons energia
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	-10	10	10	5	5
	no sabe	no sabe			
	no sabe	no sabe			
	cons masa	cons masa			
	sabe	no sabe			
	5	0			

Red de Decisión para potencia media del primer circuito



Tablas de relación probabilística para nodos aleatorios (potencia media)

Nodo: ERROR_RELATIVO

bien	0.2
regular	0.3
mal	0.5

Nodo: POTENCIA MECANICA

ERROR_RELATIVO	bien	regular	mal
sabe	0.95	0.55	0.05
no sabe	0.05	0.45	0.95

Nodo: CONSERV_ENERGIA

POTENCIA MECANICA	sabe	no sabe
sabe	0.8	0.2
no sabe	0.2	0.8

Tablas de acciones para nodos de decisión (potencia media)

Nodo: EXPERIMENTO

Decisión	Nombre
1	potencia alta baja
2	repetir problema

Nodo: LECCION

Decisión	Nombre
1	ninguna
2	pot mecanica
3	cons energia
4	cons masa

Nodo: MENSAJE

Decisión	Nombre
1	felicitaciones
2	puedes mejorar
3	revisar de nuevo

Tablas utilidad (potencia media)

Nodo: U EXPERIMENTO

ERROR RELATIVO	bien	bien	regular	regular	mal
EXPERIMENTO	potencia media	repetir problema	potencia media	repetir problema	potencia media
U EXPERIMENTO	10	0	10	0	0
	mal				
	repetir problema				
	10				

Nodo: U MENSAJE

CONSERV ENERGIA	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
CONSERV MASA	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
MENSAJE	felicitaciones	felicitaciones	puedes mejorar	puedes mejorar	revisar de nuevo
POTENCIA MECANICA	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
U MENSAJE	10	8	-5	8	-10
	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
	sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	revisar de nuevo	felicitaciones	felicitaciones	puedes mejorar	puedes mejorar
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	0	4	-6	10	5
	sabe	sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	no sabe	no sabe	sabe	sabe	sabe
	revisar de nuevo	revisar de nuevo	felicitaciones	felicitaciones	puedes mejorar
	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
	0	8	0	-8	6
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	sabe	sabe	sabe	no sabe	no sabe
	puedes mejorar	revisar de nuevo	revisar de nuevo	felicitaciones	felicitaciones
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	0	-6	8	-8	10
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	
	puedes mejorar	puedes mejorar	revisar de nuevo	revisar de nuevo	
	sabe	no sabe	sabe	no sabe	
	-6	4	6	10	

Nodo: U LECCION

CONSERV ENERGIA	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
-----------------	------	------	------	------	------

CONSERV MASA	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
LECCION	ninguna	ninguna	pot mecanica	pot mecanica	cons energia
POTENCIA MECANICA	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
U LECCION	10	-8	-10	5	-10
	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
	sabe	sabe	sabe	no sabe	no sabe
	cons energia	cons masa	cons masa	ninguna	ninguna
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	-8	-10	-8	-10	-10
	sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	pot mecanica	pot mecanica	cons energia	cons energia	cons masa
	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
	0	2	-8	-10	0
	sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	no sabe	sabe	sabe	sabe	sabe
	cons masa	ninguna	ninguna	pot mecanica	pot mecanica
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	10	-8	-10	0	0
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	sabe	sabe	sabe	sabe	no sabe
	cons energia	cons energia	cons masa	cons masa	ninguna
	sabe	no sabe	sabe	no sabe	sabe
	10	6	-5	-10	-10
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe	no sabe
	ninguna	pot mecanica	pot mecanica	cons energia	cons energia
	no sabe	sabe	no sabe	sabe	no sabe
	-10	0	10	5	5
	no sabe	no sabe			
	no sabe	no sabe			
	cons masa	cons masa			
	sabe	no sabe			
	5	0			

Apéndice G Pre y Post-Test (Turbina de Vapor)

El siguiente cuestionario corresponde para el pre-test y el post-test, la única diferencia es que el pre-test se contesta después de interactuar con la simulación.

NOTA: Las respuestas correctas se encuentran en negritas.

1.- ¿Cuál es el objetivo principal de una turbina de vapor acoplada a una turbina de gas en una planta de ciclo combinado?

- a) Reemplazar las funciones de la turbina de gas en la planta de ciclo combinado
- b) Aprovechar el calor de los gases expulsados por la turbina de gas para generar energía eléctrica adicional a la generada por la turbina de gas**
- c) Mantener una presión y una temperatura constantes en el recuperador de calor
- d) Proporcionar calor al condensador para mantenerlo funcionando

2.- La entrada principal de vapor a la turbina de Vapor proviene de:

- e) el Domo
- f) el Evaporador
- g) el Economizador
- h) el Sobrecalentador**

3.- La mezcla de vapor-líquido que sale de la turbina de Vapor se dirige hacia:

- a) el Domo
- b) el Deaador
- c) el Condensador**
- d) el Sobrecalentador

4.- El fluido llega a la turbina de Vapor en forma de:

- a) Líquido sobreenfriado
- b) Líquido saturado
- c) Vapor saturado
- d) Vapor sobrecalentado**
- e) Vapor agotado

5.- El estado principal del fluido que llega al condensador proveniente de la turbina de Vapor es:

- a) Líquido sobreenfriado
- b) Líquido saturado
- c) Vapor saturado

- d) Vapor sobrecalentado
- e) **Mezcla de líquido y vapor**

6.- El estado del fluido que sale por el sangrado de la turbina de Vapor es:

- a) Líquido sobreenfriado
- b) Líquido saturado
- c) Vapor saturado
- d) **Vapor sobrecalentado**
- e) Mezcla de líquido y vapor

7.- El vapor que sale por el sangrado de la Turbina de Vapor se dirige hacia:

- a) el Domo
- b) **el Deaerador**
- c) el Condensador
- d) el Sobrecalentador

8.- Escoge de las siguientes opciones cuál sería un rango de valores posibles para la temperatura del vapor que entra a la Turbina de Vapor:

- a) [50, 100] °C
- b) [100, 200] °C
- c) **[300, 500] °C**
- d) [800, 1000] °C

9.- Para aumentar la potencia eléctrica generada por la turbina de vapor se debe:

- a) **Aumentar la presión y la temperatura del vapor que entra a la turbina**
- b) Aumentar la presión y disminuir la temperatura del vapor que entra a la turbina
- c) Disminuir la presión y aumentar la temperatura del vapor que entra a la turbina
- d) Disminuir r la presión y la temperatura del vapor que entra a la turbina

10.- Escoge de las siguientes opciones cuál sería un rango de valores posibles para la presión del vapor que entra a la Turbina de Vapor:

- a) [50, 100] kPa
- b) [100, 1000] kPa
- c) [1000, 2000] kPa
- d) **[4000, 10000] kPa**

11.- Para disminuir la potencia eléctrica generada por la turbina de vapor se debe:

- a) Abrir la válvula de flujo de vapor a la turbina
- b) **Cerrar la válvula de flujo de vapor a la turbina**

- c) La potencia generada no depende de la fracción de apertura de la válvula de flujo de vapor

12.- ¿Cuál de las siguientes variables juega el papel más importante en la generación de potencia eléctrica?

- a) La temperatura del vapor que entra a la turbina
- b) La presión del vapor que entra a la turbina
- c) El flujo de vapor que entra a la turbina**
- d) La fracción de vapor que se envía al deareador a través del “sangrado” en la turbina.

13.- La función principal del sangrado en la turbina de vapor es:

- a) Regular la potencia generada por la turbina
- b) Aumentar la calidad del vapor agotado que se envía al condensador
- c) Disminuir la temperatura del vapor que entra a la turbina
- d) Precalentar el agua que llega al deareador proveniente del economizador.**

14.- ¿Cuál de las siguientes opciones es un rango de valores apropiado para la fracción de vapor del sangrado?

- a) **[0, 0.1]**
- b) [0.2, 0.4]
- c) [0.5, 0.7]
- d) [0.8, 1]

15.- ¿Cuál es un rango de valores apropiado para la fracción de apertura de la válvula que controla el flujo de vapor a la turbina?

- a) [0, 0.2]
- b) [0.2, 0.4]
- c) [0.4, 0.7]**
- d) [0.7, 1]

16.- Un intervalo de valores típico para la eficiencia de un generador de energía eléctrica de una turbina de vapor es:

- a) [0.1, 0.3]
- b) [0.3, 0.5]
- c) [0.5, 0.8]
- d) [0.8, 0.9]**

17.- Las unidades de la potencia eléctrica generada son:

- a) Pascal
- b) Watt**

- c) Grado Centígrado
- d) kilogramo por segundo

18.- Las unidades del flujo másico son:

- a) kPa
- b) Watt
- c) Grado Centígrado
- d) kg/s**
- e) no tiene unidades

19.- Las unidades de la presión son:

- a) kPa**
- b) Watt
- c) Grado Centígrado
- d) kg/s
- e) no tiene unidades

20.- Las unidades de la temperatura son:

- a) kPa
- b) Watt
- c) Grado Centígrado**
- d) kg/s
- e) no tiene unidades

21.- Las unidades de la entalpía específicas son:

- a) kJ/kg**
- b) Watt
- c) Grado Centígrado
- d) kg/s
- e) no tiene unidades

22.- Las unidades de la calidad de la mezcla vapor-líquido son:

- a) kJ/kg
- b) Watt
- c) Grado Centígrado
- d) kg/s
- e) no tiene unidades**

23.- La calidad de una mezcla vapor-líquido es:

- a) La fracción de vapor dentro de la mezcla**

- b) La fracción de líquido dentro de la mezcla
- c) la cantidad de vapor dentro de la mezcla
- d) la cantidad de líquido dentro de la mezcla

24.- La calidad de la mezcla vapor-líquido que sale de la turbina de vapor al condensador debe estar en el intervalo de valores:

- a) [0.1, 0.3]
- b) [0.3, 0.5]
- c) [0.5, 0.8]
- d) [0.9, 1]**

Apéndice H Cuestionario de Usabilidad

Este cuestionario servirá como objeto de estudio para la investigación sobre la percepción del ambiente de un Sistema Tutor Inteligente empleando simulaciones para el entrenamiento de operadores novatos de una planta generadora de energía eléctrica de ciclo combinado.

Para evaluar parte de los objetivos de este proyecto requerimos su valiosa participación. Le agradecemos su tiempo.

Nombre (opcional): _____

2. En qué nivel imparte sus cursos

- Preparatoria
- Profesional
- Posgrado
- Otro

3. En que área imparte sus cursos

- Física
- Matemáticas
- Computación
- Otra

4. ¿Considera usted que los simuladores pueden apoyar al profesor en el proceso de enseñanza?

- Si
- No
- Probablemente

5. ¿Ha utilizado alguna herramienta para crear simulaciones?

- Si
- No

6. ¿Ha utilizado simulaciones en sus cursos?

- Si
- No

7. Enumere del 1 al 6 los aspectos que permiten a una herramienta de software ser del agrado del usuario y por lo tanto ser utilizado, siendo 1 el más importante y 6 el menos importante:

- ___ Facilidad
- ___ Intuitiva
- ___ Rápida

- Divertida
- Barata
- Funcional

Sobre el uso de la Herramienta

Después de utilizar Si-Entreno empleando simulaciones para el entrenamiento de operadores novatos de una planta generadora de energía eléctrica de ciclo combinado, indique si usted está de acuerdo con cada una de las afirmaciones que a continuación se describen:

Las descripciones de la ponderación de la escala son:

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

Afirmación	1	2	3	4	5
P1. Los pasos para el uso de una simulación son sencillos					
P2. La configuración de variables de los objetos fue intuitiva					
P3. Los modelos presentados funcionaron correctamente					
P4. La animación es consistente					
P5. El modelo físico es consistente					
P6. El ambiente de entrenamiento brinda una presentación atractiva.					
P7. El lenguaje gráfico es agradable.					
P8. La distribución de los paneles que conforman el simulador me parece adecuada					
P9. La retroalimentación que brinda el Sistema Tutor Inteligente considero que es de utilidad para los usuarios.					
P10. Recomendaría este ambiente a mis colegas.					
P11. En general, SiEntrenO me parece útil como herramienta de apoyo a mis cursos					
P12. Usaría estas simulaciones en los cursos que imparto					

Sugerencias o comentarios:
