



8



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

291710

“Proyecto para el monitoreo de un ciclo combinado mediante una tarjeta de adquisición de datos”

TITULO DE:  
INGENIERIA MECANICA

Tesis presentada por:

Hugo Lara Velázquez

Director: M. en I. Víctor González Villela

México, D.F.

2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mis padres Rubén y Graciela porque la educación y ejemplo que me han dado han sido valiosísimos en mi vida.*

*A mis hermanos Vero y Héctor porque siempre me han apoyado y porque la confianza y cariño nos han mantenido unidos.*

*A Víctor por la ayuda y enorme paciencia que ha tenido conmigo al dirigir mi tesis.*

*A mis amigos de la Universidad: Alejandro, Ramón y Rafael por todos los momentos que vivimos juntos y porque de ellos he aprendido mucho.*

*A los profesores de la Facultad que fueron una verdadera guía en mi carrera y por quienes tengo gran admiración y respeto: Juan Ocáriz, Yukihiro Minami, Rolando Peralta, Félix Núñez y David Alvarez.*

# INDICE

INDICE .....	3
INTRODUCCIÓN.....	5
<b>GENERACIÓN DE ENERGÍA.....</b>	<b>8</b>
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TEORÍA TERMODINÁMICA.....	9
1.2 CICLOS TERMODINÁMICOS .....	10
1.2.1 <i>Ciclo Rankine</i> .....	10
1.2.2 <i>Ciclo Brayton</i> .....	15
1.2.3 <i>Ciclo combinado</i> .....	17
1.3 ANÁLISIS DEL CICLO COMBINADO.....	21
1.3.1 <i>Análisis del ciclo de gas</i> .....	22
1.3.2 <i>Análisis del ciclo de vapor</i> .....	23
1.3.3 <i>Relación de flujos gas-vapor</i> .....	24
1.3.4 <i>Desviaciones del ciclo real</i> .....	24
1.3.5 <i>Variables que se debe medir</i> .....	25
<b>MONITOREO E INSTRUMENTACIÓN.....</b>	<b>26</b>
2.1 CONCEPTOS RELACIONADOS.....	26
2.2 PROCESO DE MONITOREO.....	27
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS.....	29
2.3.1 <i>De presión</i> .....	29
2.3.2 <i>De temperatura</i> .....	32
2.3.3 <i>De caudal</i> .....	37
2.4 SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS .....	41
2.4.1 <i>De presión</i> .....	41
2.4.2 <i>De temperatura</i> .....	42
<b>ADQUISICIÓN DE DATOS.....</b>	<b>45</b>
3.1 INTERFAZ ENTRE EL ENTORNO Y LA COMPUTADORA .....	46
3.1.1 <i>Recorrido de las señales</i> .....	46
3.1.2 <i>La interfaz y sus tipos</i> .....	48
3.2 MICROCOMPUTADORAS Y SISTEMAS INMERSOS .....	48
3.2.1 <i>Unidad central de proceso</i> .....	49
3.2.2 <i>Unidades de entradas-salidas</i> .....	50
3.3 TARJETA DE ADQUISICIÓN .....	50
3.3.1 <i>Hardware y funcionamiento</i> .....	52
3.4 CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO Y PRUEBAS .....	56
<b>IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>60</b>
4.1 BASES PARA EL DISEÑO DE LA INTERFAZ .....	61
4.2 DESARROLLO DE LA INTERFAZ .....	63
4.2.1 <i>Base de datos</i> .....	63
4.2.2 <i>Funcionamiento de la aplicación</i> .....	66
4.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	68
4.3.1 <i>Comportamiento general</i> .....	69
4.3.2 <i>Comportamiento por variación de la propiedad leída</i> .....	70
4.3.3 <i>Análisis de resultados</i> .....	83

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>87</b>
APÉNDICE 1 - TABLA DE PROPIEDADES DEL GAS IDEAL AIRE	
APÉNDICE 2 - TABLA DE PROPIEDADES DEL AGUA SATURADA	
APÉNDICE 3 - TABLA DE PROPIEDADES DEL AGUA SOBRECALENTADA	
APÉNDICE 4 - DIAGRAMAS PARA FABRICACIÓN DE LA TARJETA	
APÉNDICE 5 - DIAGRAMA DE CONEXIONES ELÉCTRICAS	
APÉNDICE 6 - COMPONENTES DE UNA COMPUTADORA	
APÉNDICE 7 - CÓDIGO FUENTE PARA EL PROCESADOR 8051	
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>88</b>

## INTRODUCCIÓN

México encuentra en la industria un sector muy importante ya que, como en el resto de las naciones, contribuye enormemente al sustento económico del país. Actualmente, el mercado mundial demanda que los procesos industriales tengan un nivel de automatización avanzado que permita la fabricación de productos con un alto grado de calidad, lo cual implica, entre otras cosas, la rapidez en su elaboración y la satisfacción de los clientes.

También, el nivel de desarrollo de una nación depende en gran medida de la tecnología que se elabore dentro de la misma. Sin embargo es bien sabido que en nuestro país el desarrollo tecnológico es muy reducido y en muchas ocasiones poco difundido; esto obliga a las empresas a importar tanto equipo como técnicas para sus procesos industriales. Por ello es necesario hacer notar el esfuerzo que se hace dentro de instituciones como la nuestra, para aportar parte de la tecnología que es fundamental para el desarrollo de nuestro país.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema que permita la medición de las principales variables de un ciclo combinado mediante una tarjeta de adquisición de datos, sentando las bases para que la información pueda ser tomada por una computadora y presentada de manera dinámica en el monitor.

Como metas intermedias para lograr el objetivo, será necesario presentar el problema en cuestión, qué es lo que se tiene y a qué se quiere llegar, esto incluye la explicación de los sistemas termodinámicos y su funcionamiento, en particular los ciclos termodinámicos Brayton, Rankine y combinado. Después se presentarán las opciones para la instrumentación de un sistema en general y la elección de la mejor opción de acuerdo con los resultados que se esperan.

Una vez en este punto se presentará el desarrollo de la propuesta de este trabajo y las características de su principal elemento que, en este caso, funcionará como una tarjeta de adquisición de datos pero que es, en realidad, un sistema de propósito general bautizado con el nombre de tarjeta de desarrollo, y que fue elaborado en el Laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de nuestra Universidad.

Este tipo de tarjetas, forma parte de lo que se conoce en el nivel comercial como soluciones de medición y automatización, y que son promovidas por empresas que se dedican a ofrecer sistemas de instrumentación en todo el mundo. Por supuesto, estos sistemas se pueden adaptar a las necesidades del cliente y cubrir requisitos específicos del mismo.

Por lo anterior, el presente trabajo pretende, además de mostrar la tarjeta de desarrollo, dar un ejemplo de lo que se puede lograr con ella; y el ciclo combinado que se está armando en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de nuestra facultad sirve muy bien para tal propósito.

Para poder entender mejor el funcionamiento de los ciclos termodinámicos, en el capítulo primero se da una explicación de los conceptos termodinámicos básicos, luego se mencionan las características del ciclo Rankine y del ciclo Brayton así como la manera en la que se obtiene la eficiencia de cada uno de ellos, también se menciona el ciclo combinado (que se compone de los dos ciclos anteriores) y la importancia económica que

tiene. Finalmente se trata un aspecto que tiene que ver con las variables que se pretende monitorear, para ello se analizan nuevamente los ciclos Brayton y Rankine, pero esta vez se distinguen las variables dependientes e independientes que permiten calcular la eficiencia de cada ciclo. Este es un paso importante, pues permitirá identificar el tipo de instrumentos que se deberán utilizar en el sistema de medición. Además, se presenta la información acerca de los ajustes que se deben realizar para que los cálculos de las eficiencias se aproximen a los valores reales mediante la consideración de pérdidas energéticas en las turbinas, el compresor y la bomba.

Aparte de conocer lo concerniente a los ciclos termodinámicos, es necesario revisar los conceptos relacionados con la instrumentación, de esto trata el capítulo segundo, en donde además de los términos básicos, se mencionan las etapas para la obtención de datos y la clasificación de los instrumentos de medición en tres principales ramas: la presión, la temperatura y el caudal. Además, se incluye una parte que trata sobre la selección de los instrumentos de medición adecuados para este desarrollo, el tipo de instrumento, sus rangos de medida y las razones por las que fueron elegidos.

El capítulo tercero versa sobre una tercia de aspectos involucrados en el presente trabajo. El primero de estos aspectos es la interfaz con la computadora, es decir, cómo la computadora puede recibir información de su entorno; se mencionan las distintas manera que hay para lograr esto.

La descripción de las microcomputadoras y los sistemas inmersos, qué son y de qué se componen en términos generales, son parte de este capítulo. Luego se presentan las particularidades de la tarjeta de adquisición de datos, para continuar con los circuitos de acondicionamiento necesarios para que la tarjeta pueda manipular las señales provenientes de los instrumentos de medición o sensores.

Para terminar con este capítulo, se explican las pruebas realizadas con la tarjeta y los circuitos acondicionadores de señales.

Finalmente, el cuarto capítulo trata sobre la implementación del diseño presentado, primero lo incluye dentro de un marco práctico real, esto es, sitúa a la tarjeta de adquisición de datos y los circuitos y análisis relacionados con el Laboratorio de Máquinas Térmicas. Una parte de este capítulo trata la interfaz con el usuario; allí se menciona la importancia que tiene y se da una serie de sugerencias acerca de las características que debe tener. También se presentan los pasos a seguir en la elaboración de software.

Sigue con una descripción de la utilidad que tiene el presente trabajo en cuanto a la instalación, que a pesar de no estar dentro del alcance de la tesis, resulta simplificado gracias a la manera en que esta estructurada la tesis y la ayuda que de ella se puede obtener.

La última parte de este capítulo está dedicada a la descripción de la aplicación desarrollada para presentar en la computadora la información obtenida de la tarjeta y el procesamiento de la misma. También se presentan los resultados de las pruebas realizadas para observar el funcionamiento integral de la tarjeta de adquisición de datos y la aplicación desarrollada.

La introducción con la que se abre cada capítulo, tiene la intención de que el contenido de este último se pueda situar en un contexto social, para lo cual se presentan antecedentes relacionados con el tema que pueden incluir aspectos históricos, tecnológicos o económicos.

La sección de conclusiones y recomendaciones presenta los puntos de vista del autor acerca del trabajo realizado, tocando aspectos técnicos del desarrollo del diseño, sugerencias para una posterior implantación y para un crecimiento en las capacidades de este desarrollo explotando aún más la capacidad de procesamiento de la tarjeta, y la importancia que tiene este tipo de trabajos en el avance tecnológico del país.

Este trabajo de tesis cuenta con un apéndice en el que se encuentran algunas tablas de propiedades termodinámicas para agua y aire. También se podrán hallar ahí algunos diagramas de conexiones de la tarjeta de adquisición de datos y los diagramas sobre la disposición de los componentes y las pistas, que se utilizan para su fabricación. En otro apéndice se presentan las partes de las que se compone una computadora y en uno más el código utilizado para programar la tarjeta de adquisición de datos.



## Capítulo I GENERACIÓN DE ENERGÍA

La evolución de la humanidad ha estado indisolublemente ligada a la utilización de la energía en sus distintas formas. Sin embargo, *"Es más fácil explicar para qué sirve la energía que tratar de definir su esencia. Quizás esa sea la causa por la cual la definición más breve y común establezca que la energía es todo aquello capaz de producir o realizar algún trabajo"*<sup>1</sup>.

Sin lugar a dudas, el descubrimiento, producción y control del fuego, marca el inicio del aprovechamiento de la energía para beneficio de la humanidad. Al correr de los años, la energía que han utilizado los seres humanos proviene de muy diversas fuentes. En la época de los egipcios se utilizaba la fuerza de tracción de los esclavos y de los animales para realizar tareas de transporte y carga o en labores agrícolas.

La utilización de la energía eólica, dio un fuerte impulso a la navegación y consecuentemente, al comercio y al intercambio cultural entre las naciones; además, permitió la construcción de los molinos de viento. De manera similar, el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes de agua, liberó al hombre de tareas que requerían gran esfuerzo físico, ejemplo de esto es la molienda de grano con la invención de la rueda hidráulica.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, sucedió un acontecimiento social y económico conocido con el nombre de Revolución Industrial y cuya principal característica fue la producción en masa, posible gracias a la creación de la máquina de vapor. Este invento surgió primero como una necesidad de sacar el agua de las minas de carbón en Inglaterra y su uso se extendió hasta llegar a ser el motor de barcos y trenes. Por supuesto, para convertir el agua en vapor, era necesario emplear la energía calorífica, misma que se ha obtenido de tanto del Sol y de ciertas capas de la Tierra como de los hidrocarburos y el carbón. Actualmente, también existe la posibilidad de generar energía a partir de la desintegración de la materia.

Es importante mencionar que, mediante los inventos, el hombre ha podido transformar la energía de una forma a otra según sea más conveniente. Y de todas estas formas, existen dos que son las que resultan más útiles para el hombre: la energía eléctrica debido a la bondad que presenta para ser transportada largas distancias y por la conveniencia que tiene de transformarse de manera relativamente sencilla, en energía mecánica, que es particularmente útil, porque es la que permite realizar acciones que sustituyen a aquellas de los hombres para realizar un trabajo.

Todas estas transformaciones de la energía, son estudiadas mediante una ciencia conocida con el nombre de termodinámica. *"La termodinámica se define como la ciencia de la energía"*<sup>2</sup>. El nombre de esta ciencia tiene sus raíces en dos vocablos griegos *termos* (calor) y *dynamis* (potencia), que describen los primeros esfuerzos por convertir el calor en potencia mecánica. Hoy día el mismo concepto abarca todos los aspectos de la energía y sus transformaciones, incluidas la producción de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia.

<sup>1</sup> Comisión Federal de Electricidad; "Del fuego a la energía nuclear"; México, 1989; p. 5

<sup>2</sup> Çengel, Yunus; Boles, Michael; "Termodinámica"; Mc Graw Hill; Colombia, 1998; p. 2

## 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TEORÍA TERMODINÁMICA

Tanto en termodinámica como en otras áreas de la ingeniería mecánica, es necesario establecer definiciones que eviten las ambigüedades acerca de los conceptos que se utilizan para el análisis del objeto de estudio. Lo primero es, precisamente, definir dicho objeto de estudio. En un análisis termodinámico la región del espacio o conjunto de materia que se estudia se conoce como **sistema**; para que la definición de sistema esté completa se debe considerar el **ambiente** o **entorno** en que se encuentra, esto es, la porción de materia o región del espacio que se localiza afuera del sistema, rodeándolo por completo. Lo que diferencia a estas dos entidades (el sistema y su entorno) se conoce como **frontera**; es necesario mencionar que la frontera es siempre una superficie y, por lo tanto, no puede contener materia ni ocupar un lugar en el espacio ya que su espesor es cero. Lo anterior significa que las propiedades de la materia deben variar de manera continua a través de la superficie que se escoge como frontera, o sea, el valor de cualquier propiedad de un punto que se encuentre en dicha superficie debe ser compartido tanto por el sistema como por el entorno, ya que ambos están en contacto con el punto.

Otro aspecto importante es saber si existe un flujo de masa que cruce la frontera. Los sistemas definidos por fronteras impermeables al flujo de masa se conocen como **sistemas cerrados**, mientras que aquellos en los que la frontera puede ser atravesada por un flujo de masa se denominan **sistemas abiertos**. Se adopta entonces una terminología especial para este último tipo de sistemas: el sistema en sí, se conoce como **volumen de control**, la frontera toma el nombre de **superficie de control** y las zonas particulares de la superficie de control que son atravesadas por el flujo de masa se llaman **puertos de entrada y de salida**.

La condición de un sistema en un punto determinado en el tiempo se define por un conjunto de cantidades denominadas **propiedades termodinámicas** y nos referimos a la condición descrita por dichas propiedades como **estado**. Cabe mencionar que para que un valor obtenido en un análisis termodinámico sea considerado como propiedad, debe ser independiente de la historia del sistema cuando este cambia de un estado a otro, siendo estos dos estados distintos entre ellos. Así, cantidades como la presión y la temperatura son propiedades porque sus valores dependen exclusivamente de la condición instantánea del sistema durante la cual son medidos. Algunos ejemplos de cantidades que no son propiedades son el trabajo y la transferencia de calor.

Las propiedades termodinámicas que se presentan en ingeniería son numerosas, algunas de ellas se pueden medir de manera directa como la presión y la temperatura y otras se obtienen a partir de dichas mediciones como la energía interna, la entalpía y la entropía. Aquellas propiedades que dependen del tamaño del sistema se conocen como **propiedades extensivas**, algunos ejemplos son el volumen, la entropía y la energía interna. En cambio, las propiedades cuyos valores no dependen del tamaño del sistema toman el nombre de **propiedades intensivas**, por ejemplo, la presión y la temperatura. La colección de todas las propiedades intensivas de un sistema constituye el **estado intensivo**. Esta división de las propiedades nos permite definir el concepto de **fase**, que es el conjunto de todas las partes de un sistema con el mismo estado intensivo y los mismos valores por unidad de masa de las propiedades extensivas. Un ejemplo de esto y que más adelante será de utilidad al estudiar el ciclo Rankine es la mezcla líquido-vapor en equilibrio, en donde todas las gotitas líquidas dispersas tienen la misma presión,

temperatura, volumen específico, entalpía específica, etc.: todas juntas, las gotitas representan la fase líquida.

En la ingeniería termodinámica se emplea la palabra **proceso**, ésta se usa para referirse al cambio de un sistema a partir de un estado inicial hacia un estado final. Pero conocer el proceso no significa únicamente conocer los estados inicial y final, sino las interacciones del sistema con su entorno, ejemplos: la transferencia de calor, trabajo, masa y entropía. Se conoce como **ruta** o **trayectoria del proceso** a la historia o la sucesión de estados por los que debe atravesar al sistema para pasar del estado inicial al final. Recordando las cantidades que no se consideran propiedades termodinámicas, cabe mencionar que sus valores no dependen únicamente de los estados inicial y final sino también de la trayectoria que se sigue. Finalmente, un caso particular de los procesos termodinámicos es el **ciclo**, en donde el estado final y el estado inicial coinciden.

Hasta aquí se han repasado los conceptos fundamentales de la ingeniería termodinámica que nos servirán para entender los siguientes temas en donde se presentan los ciclos termodinámicos que forman parte del estudio de este trabajo.

## 1.2 CICLOS TERMODINÁMICOS

Existen diferentes tipos de ciclos termodinámicos encaminados a la generación de energía, pero en el caso particular que estudiaremos, el ciclo que nos interesa estudiar es el ciclo combinado. Es en este ciclo en donde se pretende utilizar el sistema que se desarrolla en esta tesis. No se trata de un ciclo único, de hecho, se debe a que el ciclo combinado se forma a partir de la unión de otros dos ciclos, el ciclo Rankine y el ciclo Brayton.

La importancia del ciclo combinado, como se verá más adelante, radica en que la eficiencia del mismo es mayor que la que se obtendría si los ciclos que lo componen trabajaran por separado. Sin embargo, para poder estar seguro de esto, se deben tomar medidas de manera práctica, analizarlas y ver si los resultados están de acuerdo con la teoría. El desarrollo del presente trabajo pretende ayudar a lograr esto.

Para saber cuáles son las variables físicas que debemos medir, primer es necesario entender la manera en que opera el sistema. Por ello es que a continuación se presenta una breve descripción del ciclo combinado y de cada uno de los ciclos que lo conforman.

### 1.2.1 Ciclo Rankine

El ciclo Rankine pertenece a los llamados ciclos de potencia de vapor, durante los cuales el fluido de trabajo se evapora y condensa alternadamente. El vapor de agua (en adelante llamado únicamente vapor) es el fluido de trabajo más empleado en este tipo de ciclos debido a sus características: bajo costo, alta disponibilidad y elevada entalpía de vaporización. Si hablamos de las plantas generadoras de energía eléctrica en el nivel mundial que emplean el ciclo Rankine, éstas se denominan centrales nucleoelectricas, carbóelectricas o de gas natural según el tipo de combustible que se utilice para proporcionar el calor necesario para la evaporación. En el caso particular del generador de vapor del Laboratorio de Máquinas Térmicas, el combustible que se emplea es diesel. Sin embargo, el vapor sigue el mismo ciclo básico en todos estos casos, por tanto, pueden analizarse de la misma manera.

Como ciclo ideal para las plantas de potencia de vapor, el ciclo Rankine no incluye ninguna irreversibilidad interna, esto es, se trata de una operación reversible en donde se puede recuperar completamente la disponibilidad o potencial de trabajo suministrado al proceso. Los procesos que componen al ciclo Rankine son los siguientes:

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

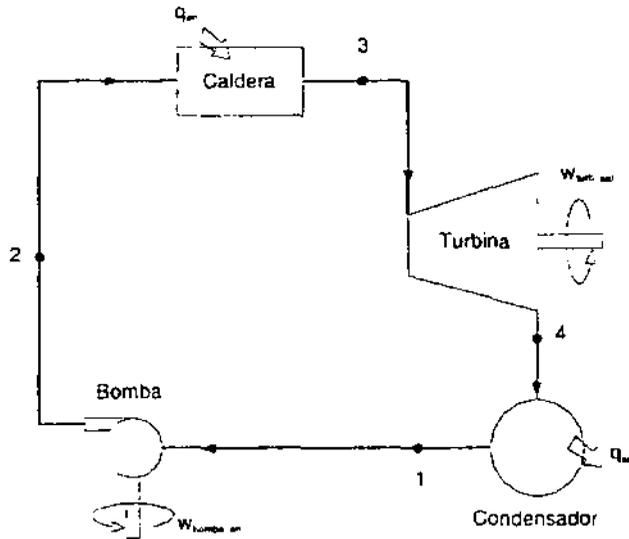


Figura 1.1 - Ciclo Rankine ideal

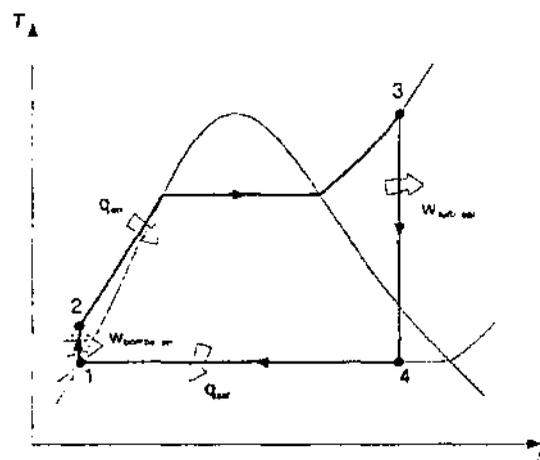


Figura 1.2 - Diagrama T-s del ciclo Rankine

El agua entra en la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se comprime de manera isentrópica hasta la presión de operación de la caldera. La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua. Esto se ve mediante la línea vertical correspondiente en el diagrama T-s.

El agua entra en la caldera como un líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. Esto se debe a que la caldera actúa como un intercambiador de calor donde dicho calor, proveniente de alguna fuente como la combustión de diesel, por ejemplo, se transfiere al agua a presión constante. A la caldera y el sobrecalentador se les conoce como generador de vapor.

El vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la turbina donde se expande isentrópicamente y produce trabajo al hacer girar la flecha conectada a un generador eléctrico. Tanto la presión como la temperatura disminuyen en este proceso hasta llegar al estado 4, donde el vapor entra al condensador. En este estado, el vapor suele ser una mezcla saturada líquido-vapor con una calidad alta. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, el cuál actúa como un intercambiador de calor, que rechaza calor hacia un medio de enfriamiento, en nuestro caso agua. El vapor abandona el condensador como líquido saturado y, en el caso del ciclo ilustrado, es regresado por la bomba para completar el ciclo. En el laboratorio se tiene una cisterna para almacenar agua entre el condensador y la bomba, en donde además, la temperatura del agua alcanza la temperatura ambiente.

Si recordamos que el área bajo la curva de un diagrama temperatura-entropía (diagrama T-s) representa la transferencia de calor para procesos reversibles internamente, resulta que el área bajo la curva del proceso 2-3 representa el calor transferido al fluido de trabajo en el generador de vapor, mientras que el área bajo la curva del proceso 4-1 representa el calor rechazado por el agua en el condensador. La diferencia entre estas dos áreas, o sea, el área encerrada por el ciclo, constituye el trabajo neto producido durante el mismo.

Para realizar el análisis de energía del ciclo Rankine, se comienza reconociendo que los cuatro elementos que lo integran (generador de vapor, turbina, condensador y bomba), son elementos de flujo permanente y por lo tanto, los cuatro procesos del ciclo se pueden analizar como procesos de flujo permanente. Por otro lado, los cambios en la energía cinética y potencial del vapor se pueden considerar despreciables si se comparan con los valores del trabajo y la transferencia de calor del ciclo, esto permite reducir la ecuación de energía de flujo permanente por unidad de masa de vapor a lo siguiente:

$$q - w = h_e - h_i \quad (\text{kJ/kg})$$

Recordando que tanto la caldera como el condensador no incluyen ningún trabajo, y que se supone que la turbina y la bomba son isentrópicas, la relación para la conservación de la energía de cada dispositivo se tiene de la siguiente forma:

Bomba ( $q=0$ ):  $w_{bomba} = h_2 - h_1$

Y como el trabajo en un proceso internamente reversible para una operación de flujo permanente se puede escribir en términos del volumen específico y de la presión, se tiene que:

$$w_{bomba, en} = v(P_2 - P_1)$$

donde  $h_i = h_f @ P_i$  y  $v \cong v_1 = v_f @ P_1$

Caldera (w=0):  $q_{en} = h_3 - h_2$

Turbina (q=0):  $w_{turbina, sal} = h_3 - h_4$

Condensador (w=0):  $q_{sal} = h_4 - h_1$

Y la eficiencia térmica del ciclo Rankine se puede obtener como

$$\eta_t = \frac{w_{neto}}{q_{en}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{en}}$$

en donde  $w_{neto} = q_{en} - q_{sal} = w_{turbina, sal} - w_{bomba, en}$

En términos del diagrama T-s se puede observar que la eficiencia corresponde a la relación entre el área encerrada por el ciclo y el área bajo la curva de adición de calor.

En la práctica, el ciclo de potencia de vapor real, difiere del ciclo ideal Rankine debido a la presencia de irreversibilidades en distintos componentes. Las fuentes más comunes de irreversibilidades son la fricción del fluido y la pérdida no deseada de calor a los alrededores. La diferencia entre ambos ciclos se puede apreciar en el siguiente diagrama.

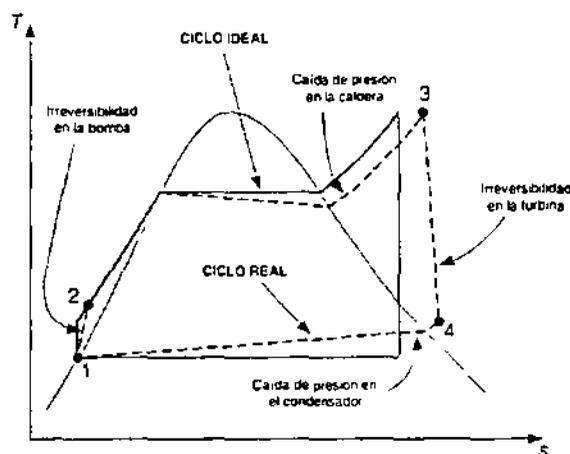


Figura 1.3 - Desviación del ciclo Rankine ideal

La fricción del fluido ocasiona una pérdida de presión tanto en la caldera como en el condensador. Esto ocasiona que la presión a la salida de la caldera no sea la misma que a la entrada, además, la presión a la entrada de la turbina también es menor que la

presión a la salida de la caldera debido a la fricción del fluido en los tubos conectores. Para compensar las irreversibilidades, usualmente se bombea el fluido a una presión más alta que la de operación.

La otra fuente de irreversibilidad, la pérdida térmica, se produce a través de varios componentes; para compensarla es necesario transferir más calor al vapor en la caldera con el fin de mantener la salida neta de trabajo lo más cercana a aquella del ciclo ideal. Por supuesto, esto reduce la eficiencia del ciclo.

Por otra parte, las irreversibilidades en la bomba y en la turbina toman una importancia particular ya que, en condiciones ideales, se consideran isentrópicas, pero en realidad existen pequeñas desviaciones que se calculan a través de las eficiencias adiabáticas de dichos dispositivos.

$$\eta_{bomba} = \frac{w_s}{w_p} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$\eta_{turbina} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{3a}}{h_3 - h_{3s}}$$

donde los estados 2a y 4a son los estados de salida reales de la bomba y la turbina respectivamente, y 2s y 4s son los estados correspondientes para el ciclo ideal.

Con el fin de incrementar la eficiencia del ciclo de potencia de vapor, se pueden realizar algunas operaciones adicionales como la reducción de la presión del condensador, el sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas y el incremento de la presión en la caldera. Los tres procedimientos persiguen la misma idea básica: Aumentar la temperatura promedio a la cual el calor se transfiere al fluido de trabajo en la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la cual el calor se rechaza del fluido de trabajo en el condensador.

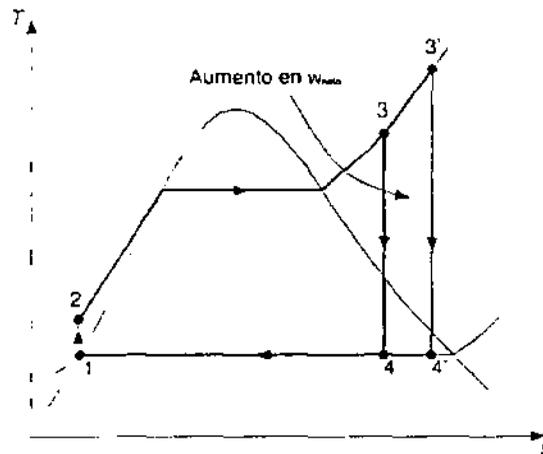


Figura 1.4 - Ciclo Rankine con sobrecalentamiento

Es común emplear el sobrecalentamiento haciendo pasar el vapor que sale de la turbina a través de una resistencia eléctrica que se encarga de aumentar la temperatura a la que el vapor entra en la turbina. Desde luego, esta temperatura está limitada por consideraciones metalúrgicas de los álabes de la turbina y por lo general no puede exceder los 620°C. El aumento en el trabajo neto que se produce se ilustra en la figura 1.4.

### 1.2.2 Ciclo Brayton

Aparte de los ciclos de potencia de vapor, existen los llamados ciclos de potencia de gas, en donde el fluido de trabajo permanece en la fase gaseosa durante todo el ciclo. El ciclo Brayton pertenece a esta categoría.

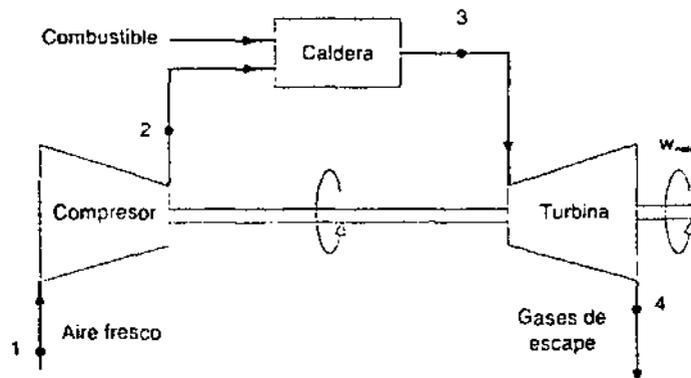


Figura 1.5 - Esquema del ciclo Brayton abierto

Este ciclo opera de manera práctica en las turbinas de gas y, a diferencia del ciclo Rankine que es un ciclo cerrado de combustión externa, se trata de un ciclo abierto de combustión interna, porque el calor transferido al fluido de trabajo se genera al quemar el combustible dentro de la frontera del sistema, y funciona de la siguiente manera: aire fresco en condiciones ambientales se introduce dentro de un compresor donde su temperatura y presión se elevan. El aire de alta presión sigue hacia la cámara de combustión donde el combustible se quema a presión constante. Luego los gases de alta temperatura que salen de la cámara de combustión entran a la turbina, donde se expanden hasta la presión atmosférica, de tal forma que producen potencia. Los gases de escape son arrojados al ambiente, lo que provoca que el ciclo se clasifique como abierto.

Con el fin de poder estudiar este ciclo de turbina de gas se supone cerrado, tal y como se muestra en la figura 1.6.

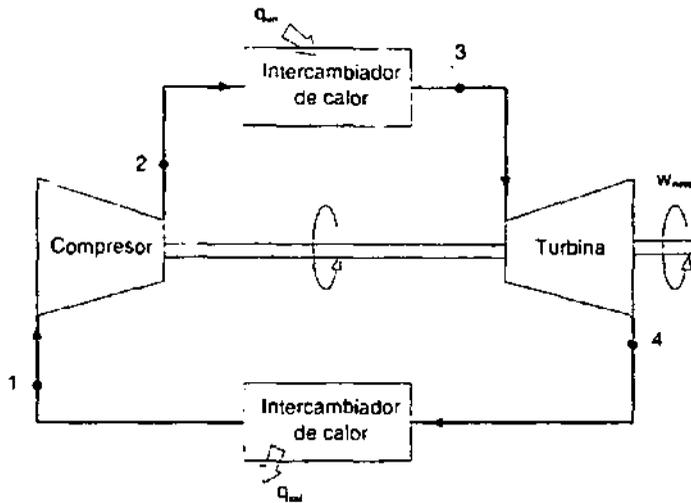


Figura 1.6 - Esquema del ciclo Brayton cerrado

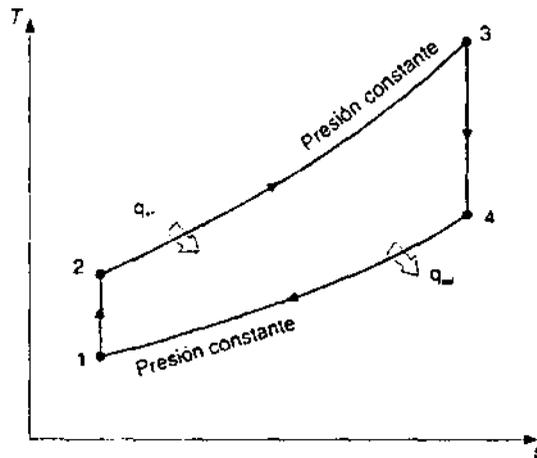


Figura 1.7 - Diagrama T-s del ciclo Brayton

En este caso los procesos de compresión y expansión permanecen iguales, pero el proceso de combustión se sustituye por un proceso de adición de calor a presión constante y el proceso de escape se reemplaza por uno de rechazo de calor a presión constante. El ciclo ideal resultante se conoce como ciclo Brayton, integrado por cuatro procesos reversibles:

- 1-2 Compresión isentrópica en un compresor
- 2-3 Adición de calor a presión constante
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante

Tal y como sucedió en el ciclo Rankine, los cuatro procesos anteriores se ejecutan en dispositivos de flujo permanente, por lo que se puede emplear la ecuación de la conservación de la energía para flujo permanente por unidad de masa, y si los cambios en la energía cinética y potencial del gas son ignorados, la ecuación queda:

$$q - w = h_e - h_i \quad (\text{kJ/kg})$$

Si se suponen calores específicos constantes a temperatura ambiente (suposición de aire frío estándar), la transferencia de calor hacia y desde el fluido de trabajo queda:

$$q_{em} = q_{23} = h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{sal} = -q_{41} = h_4 - h_1 = C_p(T_4 - T_1)$$

Por lo que la eficiencia térmica del ciclo Brayton se puede escribir como:

$$\eta_t = \frac{w_{neto}}{q_{em}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{em}} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Como los procesos 1-2 y 3-4s son isentrópicos y  $P_2=P_3$  y  $P_4=P_1$ s, se tiene:

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

Sustituyendo lo anterior en la expresión de la eficiencia térmica del ciclo se obtiene:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}}$$

donde  $r_p = \frac{P_2}{P_1}$  es la relación de presiones y  $k$  la relación de calores específicos.

Se ve que bajo las suposiciones realizadas, la eficiencia térmica de un ciclo Brayton ideal depende de la relación de presiones en la turbina de gas y de la relación de calores específicos del fluido de trabajo.

### 1.2.3 Ciclo combinado

Con el objeto de obtener siempre las eficiencias más altas posibles en las plantas generadoras de energía, se realizan modificaciones a los ciclos de potencia.

Una de estas modificaciones se compone de un ciclo de gas superior a un ciclo de vapor, el cual se denomina ciclo combinado de gas-vapor, o sólo ciclo combinado.

Así, se puede tener un ciclo de turbina de gas (Brayton) trabajando junto con el ciclo de turbina de vapor (Rankine), el ciclo combinado que resulta tiene una eficiencia más alta que cualquiera de los ciclos ejecutados por separado.

Los ciclos de potencia de gas operan a temperaturas mucho más altas que los ciclos de potencia de vapor. Así, la temperatura máxima del fluido al entrar a la turbina suele ser cercana a  $620^{\circ}\text{C}$  en las plantas de vapor modernas, mientras que está por encima de los  $1150^{\circ}\text{C}$  en las plantas de potencia de turbina de gas. Debido a esta alta temperatura a la que el fluido entra en la turbina, las plantas de potencia de gas podrían tener una eficiencia térmica más elevada, sin embargo, el problema radica en que la temperatura de salida de los gases de la turbina también es alta, lo cual anula la posibilidad de una ganancia en la eficiencia térmica.

La característica principal del ciclo combinado consiste en aprovechar los gases de escape del ciclo de turbina de gas, que tienen una alta temperatura y que, como se explicó anteriormente, se suelen arrojar a la atmósfera. En vez de esto, la energía de los gases de escape se transfiere al ciclo de potencia de vapor mediante un intercambiador de calor que sirve como caldera. En general se requiere más de una turbina de gas para suministrar suficiente calor al vapor.

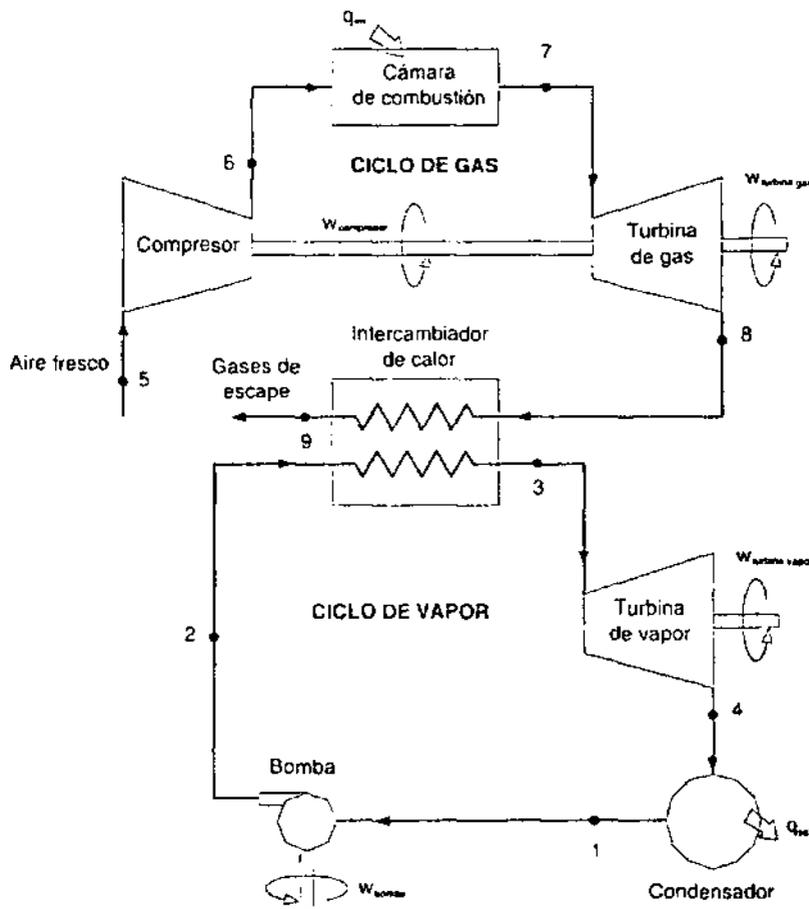


Figura 1.8 - Esquema del ciclo combinado

La figura 1.8 muestra el esquema general de una planta de potencia combinada gas-vapor, en donde se puede apreciar de manera esquemática el aumento de eficiencia en el ciclo combinado, en comparación con cada uno de los ciclos por separado, ya que la

eficiencia en general se define como la razón entre el trabajo neto obtenido y el calor suministrado.

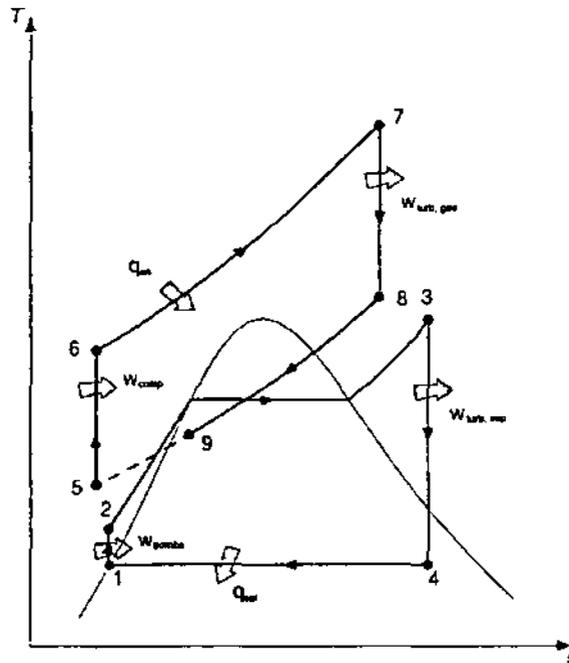


Figura 1.9 - Diagrama T-s del ciclo combinado

Se puede decir entonces, que la eficiencia del proceso es:

$$\eta_i = \frac{w_{neto}}{q_{en}} = \frac{w_{neto,gas} + y(w_{neto,vapor})}{q_{en}}$$

en donde  $y$  es la relación de flujos de gas y vapor en el intercambiador de calor. La necesidad de utilizar esta relación de flujos para obtener el trabajo total o neto del ciclo combinado resulta de lo siguiente: el calor se suministra al proceso en la parte correspondiente al ciclo de gas, por lo que la cantidad de calor está dada por unidad de masa de gas. Lo mismo sucede con el trabajo obtenido en la turbina de gas; sin embargo, el trabajo obtenido en la turbina de vapor, está dado por unidad de masa del vapor.

Para que se pueda manejar las mismas unidades en la fórmula de la eficiencia, será necesario utilizar una relación que permita representar el trabajo de la turbina de vapor en unidades de masa de gas. Una relación del tipo

$$y = \frac{\dot{m}_{vapor}}{\dot{m}_{gas}}$$

representa la cantidad de masa de vapor que circula en el proceso, por unidad de masa de gas. Así, al multiplicar la relación de flujos por el trabajo en la turbina de vapor, el

resultado será la cantidad de trabajo en dicha turbina, pero referido a unidades de masa de gas y con ello calcular la eficiencia del ciclo combinado.

En relación con los otros valores de la fórmula de la eficiencia, el calor de entrada es el que se suministra en la cámara de combustión del ciclo de gas, y se calcula de la misma forma que se observó en la parte correspondiente a este ciclo. El trabajo neto del ciclo de vapor se calcula como el trabajo en la turbina de vapor menos el trabajo que se suministra a la bomba. De manera similar el trabajo proporcionado por el ciclo de gas se obtiene restando el trabajo necesario para mover al compresor del trabajo obtenido en la turbina de gas.

De manera que, de acuerdo con el esquema del ciclo combinado que se muestra:

$$q_{em} = h_7 - h_6$$

$$W_{neto,vapor} = W_{turb,vapor} - W_{bomba}$$

$$W_{neto,gas} = W_{turb,gas} - W_{comp}$$

El calor que se suministra al ciclo de vapor, así como el calor que sale del ciclo de gas, no se consideran de manera directa en la fórmula de la eficiencia, ya que la transferencia de calor en el intercambiador de calor es un proceso interno del ciclo combinado, y en la eficiencia, se considera únicamente lo que sucede a través de la frontera del sistema.

Los recientes desarrollos en la tecnología de las turbinas de gas han hecho al ciclo combinado de gas-vapor económicamente atractivo, ya que *"aumenta la eficiencia sin incrementar en modo apreciable el costo inicial. En consecuencia, muchas plantas de potencia nuevas operan con ciclos combinados, de tal forma que muchas plantas de vapor o de turbina de gas se están convirtiendo en plantas de potencia de ciclo combinado. Se ha informado de eficiencias térmicas muy por arriba de 40% como resultado de la conversión"*<sup>3</sup>.

Un ejemplo de lo anterior lo encontramos en el trabajo de Quezada y Quezada<sup>4</sup>, quienes realizaron un estudio acerca de la viabilidad para la conversión de una planta de potencia que trabajaba con turbogeneradores de gas en una planta de ciclo combinado, encontrando que al colocar un ciclo de vapor que empleara los gases de salida del ciclo de gas, el funcionamiento completo de la planta tendría una eficiencia mayor. La producción que se tenía con los dos turbogeneradores de gas era de 49.8 MW en total, trabajando con una eficiencia del 25%. Al hacer la conversión al ciclo combinado la producción se aumentaba en casi 50% y la eficiencia ascendía hasta 42.2%.

No cabe duda de que la generación de potencia eléctrica mediante un ciclo combinado, contribuye a mejorar la economía nacional y el medio ambiente también, ya que ahorra combustible y no deja escapar gases con altas temperaturas al ambiente. Esto es importante, pues debemos recordar que los proyectos de ingeniería en su mayoría se rigen, actualmente, por tres factores: el energético, el económico y el ambiental. Un ciclo de potencia combinado cumple con ellos.

<sup>3</sup> Çengel, Yunus; Boles, Michael; "Termodinámica"; Mc Graw Hill; Colombia, 1998; p. 555

<sup>4</sup> Quezada, José; Quezada, Enrique; "Conveniencia económica de la conversión a ciclo combinado gas-vapor de una planta eléctrica turbogas en ciclo abierto"; Universidad Anáhuac; México, 1993

### 1.3 ANÁLISIS DEL CICLO COMBINADO

Ahora que se conoce la manera en que opera un ciclo combinado, se puede hacer un análisis del mismo. Para el caso concreto que se plantea en el presente trabajo, el objetivo consiste en diseñar un sistema para la adquisición de determinadas variables de un proceso termodinámico para su posterior visualización en el monitor de una computadora.

La manera en que se pretende lograr dicho objetivo, es a través de distintos instrumentos de medición que permitan recolectar las variables involucradas, luego trasmitirlas y acondicionarlas para que puedan ser introducidas a la computadora a través de la interfaz de comunicaciones y procesadas posteriormente. Esta sección estará enfocada en la primera parte, es decir, a las variables involucradas y que deben ser medidas; habrá que definir claramente cuáles son las variables implicadas en el proceso termodinámico, para poder seleccionar los instrumentos adecuados para medirlas. Lo anterior dependerá de aquello que se desea conocer finalmente. En el caso particular, lo que interesa saber es la eficiencia del ciclo combinado.

Ahora se verá paso a paso la obtención de dicha eficiencia, con el objeto de determinar cuáles son las variables que se tienen que medir directamente en el proceso, y cuáles son las que se pueden calcular de manera indirecta sin necesidad de medirlas.

En seguida se reproduce nuevamente el diagrama T-s del ciclo combinado para facilitar la comprensión de las variables.

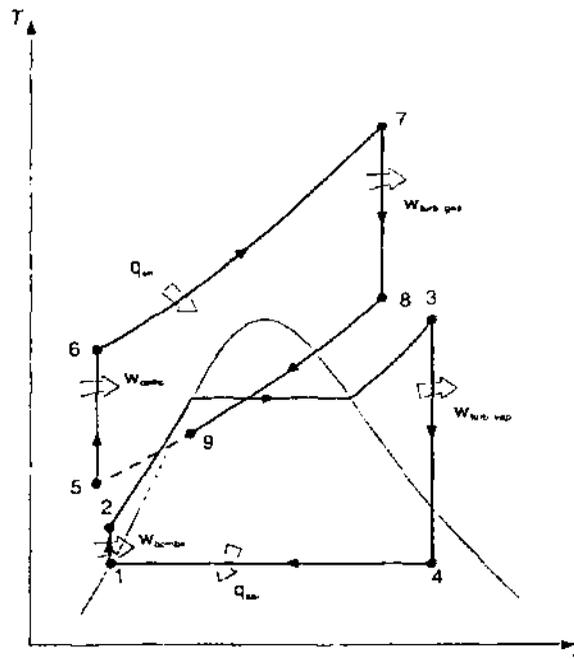


Figura 1.10 - Diagrama T-s del ciclo combinado

Y la fórmula para calcular la eficiencia del ciclo combinado.

$$\eta_i = \frac{w_{neto}}{q_{en}} = \frac{w_{neto, gas} + y(w_{neto, vapor})}{q_{en}}$$

### 1.3.1 Análisis del ciclo de gas

Si conocemos la temperatura a la entrada del compresor ( $T_5$ ), se puede fácilmente calcular la entalpía en ese punto ( $h_5$ ) acudiendo a la tabla de propiedades del aire como gas ideal (A-1), de ahí también se puede obtener la presión relativa ( $P_{r5}$ ) que servirá para obtener las propiedades del punto 6.

Para ello, se debe recordar que en un proceso isentrópico, la relación de presiones entre el estado anterior (a) y posterior (b) al proceso queda expresada así<sup>5</sup>:

$$\left( \frac{P_a}{P_b} \right)_{s=const.} = \frac{P_{ra}}{P_{rb}}$$

Si se conocen entonces las presiones  $P_5$  y  $P_6$ , o la relación entre ellas ( $r_{p56}$ ), se puede obtener la presión relativa  $P_{r6}$  a partir de  $P_{r5}$ .

Una vez que se conoce  $P_{r6}$ , se puede obtener de la misma tabla A-1, los valores correspondientes de temperatura ( $T_6$ ) y de entalpía ( $h_6$ ).

Esto mismo se puede realizar para la turbina de gas, si se conoce la temperatura a la salida de la cámara de combustión. Finalmente, en el punto 9 se puede tomar la temperatura ( $T_9$ ) y obtener la entalpía ( $h_9$ ) mediante el uso de la tabla A-1.

El siguiente esquema presenta el resumen de las operaciones que se deben realizar en el ciclo de gas para obtener los datos que nos ayudarán a obtener la eficiencia del ciclo combinado:

Paso	Conozco	Obtengo
1	$T_5$	$h_5, P_{r5}$
2	$P_5, P_6$	$r_{p56}$
3	$P_{r5}, r_{p56}$	$P_{r6}$
4	$P_{r6}$	$T_6, h_6$
5	$T_7$	$h_7, P_{r7}$
6	$P_7, P_8$	$r_{p78}$
7	$P_{r7}, r_{p78}$	$P_{r8}$
8	$P_{r8}$	$T_8, h_8$
9	$T_9$	$h_9$

Tabla 1.1 Pasos para obtener las propiedades necesarias para el cálculo de la eficiencia del ciclo de gas

<sup>5</sup> Çengel, Yunus; Boles, Michael; "Termodinámica"; Mc Graw Hill; Colombia, 1998; p. 338

Así, se puede calcular lo siguiente:

$$q_{en} = h_7 - h_6$$

$$w_{turb.gas} = h_7 - h_8$$

$$w_{comp} = h_6 - h_5$$

$$w_{neto.gas} = w_{turb.gas} - w_{comp}$$

### 1.3.2 Análisis del ciclo de vapor

Ahora toca el turno al ciclo de vapor; para calcular la eficiencia del ciclo combinado, hace falta saber la cantidad de trabajo neto que proporciona el ciclo de vapor. La manera de obtener dicha cantidad se describe a continuación.

Si se conoce la presión antes de la bomba ( $P_1$ ) se puede determinar otras propiedades para ese estado, sabiendo que en ese punto el fluido se considera líquido saturado; entonces, acudiendo a la tabla de propiedades del agua saturada (A-2), se obtiene  $h_1$  como  $h_{f@P_1}$  y  $v_1$  como  $v_{f@P_1}$ . Luego, conociendo la presión antes del intercambiador de calor ( $P_2$ ) y sabiendo la bomba trabaja de manera isentrópica y despreciando los cambios de energía cinética y potencial, se tiene que:

$$w_{bomba} = v_1 (P_2 - P_1)$$

Luego se puede conocer el valor de la entalpía en el punto 2 ( $h_2$ ) si se suma el trabajo realizado por la bomba sobre el fluido ( $w_{bomba}$ ) al valor de la entalpía en el punto 1 ( $h_1$ ).

Para poder determinar el estado del fluido en el punto 3, es necesario conocer la temperatura y presión en ese punto ( $T_3$  y  $P_3$ ). Con estos datos, se puede obtener de la tabla de propiedades del agua sobrecalentada (A-3), los valores de la entalpía ( $h_3$ ) y de la entropía ( $s_3$ ). Finalmente, se sabe que la turbina funciona de manera isentrópica y que a la salida de la misma, el agua se encuentra como líquido saturado. Conociendo la presión en este punto ( $P_4$ ) y considerando que  $s_4 = s_3$ , se puede obtener de la tabla A-2 la calidad  $x_4$  y con ello la entalpía a la salida de la turbina ( $h_4$ ).

El trabajo de la turbina de vapor y el trabajo neto del ciclo de vapor se pueden calcular como:

$$w_{turb.vapor} = h_3 - h_4$$

$$w_{neto.vapor} = w_{turb.vapor} - w_{bomba}$$

Haciendo un resumen de las operaciones para obtener los datos del ciclo de vapor, con el objeto de conocer la eficiencia del ciclo combinado se tiene:

Paso	Conozco	Obtengo
1	$P_1$	$h_1, v_1$
2	$P_1, P_2, v_1, h_1$	$h_2$
3	$T_3, P_3$	$h_3, s_3$
4	$s_3$	$s_4$
5	$P_4, s_4$	$h_4$

Tabla 1.2 Pasos para obtener las propiedades necesarias para el cálculo de la eficiencia del ciclo de vapor

### 1.3.3 Relación de flujos gas-vapor

El único valor que falta para poder calcular la eficiencia del ciclo combinado de acuerdo con la fórmula presentada al inicio de la sección, es la relación de flujos en el intercambiador de calor ( $y$ ).

Como se mencionó en el capítulo correspondiente a los ciclos termodinámicos, esta relación permite establecer el trabajo neto obtenido en el ciclo de vapor en unidades de masa de gas, esta relación se determina a partir de un balance de energía en el intercambiador de calor:

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W} &= \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_e h_e \\ 0 &= \dot{m}_g h_9 + \dot{m}_v h_3 - \dot{m}_g h_8 - \dot{m}_v h_2 \\ \dot{m}_v (h_3 - h_2) &= \dot{m}_g (h_8 - h_9) \\ y &= \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_g} = \frac{h_8 - h_9}{h_3 - h_2} \end{aligned}$$

y como previamente se calculó todos los valores de las entalpías para cada punto del ciclo combinado, lo único que se debe hacer es sustituir en esta fórmula.

### 1.3.4 Desviaciones del ciclo real

Los análisis que se acaban de presentar funcionan correctamente si se supone que los elementos que componen al ciclo trabajan de forma ideal. Sin embargo, existen algunas correcciones que deben tomarse en cuenta para que los resultados se acerquen más a la realidad. Por un lado existe cierta disminución de la presión durante los procesos de adición y rechazo de calor, esto es inevitable, pero más importante aún es la entrada y salida de trabajo real de los ciclos. Realmente, ni la bomba, ni el compresor, ni las turbinas trabajan de manera isentrópica, para reflejar estos hechos en los análisis, se debe considerar la eficiencia adiabática de estos elementos. De manera general se sabe que la eficiencia adiabática de un elemento entre los estados a y b se calcula como sigue<sup>6</sup>:

<sup>6</sup> Çengel, Yunus; Botes, Michael; "Termodinámica"; Mc Graw Hill; Colombia, 1998; p.p. 478 y 528

$$\eta_a = \frac{w_s}{w_a} \cong \frac{h_a - h_{bs}}{h_a - h_{bs}} \quad (\text{para la bomba y el compresor})$$

$$\eta_a = \frac{w_a}{w_s} \cong \frac{h_a - h_{bs}}{h_a - h_{bs}} \quad (\text{para las turbinas})$$

Así, si se conocen las eficiencias adiabáticas de los elementos involucrados, se puede obtener el trabajo real de cada uno de ellos a partir del trabajo ideal respectivo que se obtuvo en los análisis de esta sección, para luego sustituirlo en la fórmula de la eficiencia del ciclo combinado.

### 1.3.5 Variables que se debe medir

Finalmente, se está en condiciones de precisar las variables del proceso que se debe medir, con el objeto de obtener todos los datos necesarios para calcular la eficiencia del ciclo combinado y los rangos de valores entre los que se encuentran.

Estos datos son obtenidos a partir de referencias como Çengel, Marks, el manual de la turbina de gas del Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería y apuntes personales de las prácticas tomadas en dicho laboratorio.

Presiones	Valor aproximado en kPa
P <sub>1</sub>	100
P <sub>2</sub>	3000
P <sub>3</sub>	3000
P <sub>4</sub>	100
P <sub>5</sub>	100
P <sub>6</sub>	300
P <sub>7</sub>	300
P <sub>8</sub>	100
Temperaturas	Valor aproximado en K
T <sub>3</sub>	650
T <sub>5</sub>	300
T <sub>7</sub>	1500
T <sub>9</sub>	800

Tabla 1.3 Variables que se debe medir

Ahora se sabe cuáles son las variables físicas que se deben medir para conocer la eficiencia del proceso, cuál es su ubicación dentro del mismo y cuáles son los rangos de valores en los que operan.

El siguiente capítulo servirá para conocer las opciones de instrumentación que se tiene y, junto con los resultados de este capítulo, elegir los instrumentos que mejor convenga para realizar la instrumentación del proceso.

IMPRESOS  
*M***OYA**

TESIS  
URGENTES

LIBROS \*  
FOLLETOS \*  
OFFSET \*  
SOCIALES \*

*Agustín Juárez S.*

CUBA No. 99 DESP. 1, 1er. PISO  
COL. CENTRO

MEXICO, D.F.  
CEL. 044-2111-4601

## Capítulo II

# MONITOREO E INSTRUMENTACIÓN

La actividad de medir es algo que ha realizado el hombre desde hace mucho tiempo. Se sabe por ejemplo, que los Griegos realizaron intentos de medición del tamaño de la tierra<sup>7</sup>. Desde entonces y hasta nuestros días el acto de medir ha formado parte de la vida diaria y se ha vuelto una práctica tan común, que muchas veces no estamos conscientes de que estamos midiendo.

La importancia de la medición se explica mediante la siguiente cita de Lord Kelvin: *"Cuando se puede medir aquello a que nos referimos y expresarlo en números, sabemos entonces algo acerca de ello; pero cuando no es posible medirlo en números, nuestro conocimiento es escaso y muy insatisfactorio"*<sup>8</sup>. Sin embargo, la sola información obtenida a través de las mediciones no es útil. Se requiere saber interpretar los resultados obtenidos de manera que se pueda sacar provecho de ello.

Uno de los sectores que recurre necesariamente a las mediciones actualmente, es el sector industrial. Los procesos industriales son muy variados y abarcan muchos tipos diferentes de productos: la fabricación de los productos derivados del petróleo, los productos alimenticios, la industria cerámica, las centrales generadoras de energía, la siderurgia, la industria papelera, la industria textil, etc.

En todos estos procesos es necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, el pH, la humedad, la velocidad, etcétera.

A través de los años, la tecnología y la industria se han desarrollado y junto con ellas lo han hecho los procedimientos de medición. Anteriormente era un operario el que se encargaba de la lectura y del control de los procesos industriales, utilizando para ello instrumentos simples de medición como termómetros, manómetros y válvulas manuales. Sin embargo, gradualmente los procesos industriales se han vuelto más complejos, de manera que para llevarlos a cabo eficientemente, se necesita automatizarlos; para esto se necesitan nuevos instrumentos de medición y control. Esto tiene diferentes aspectos positivos, algunos de los cuales son que el operador se dedica más a la supervisión de los procesos desde centros de control. En otros procesos como los que involucran sustancias tóxicas o peligrosas, obtiene mayor seguridad física. Por otro lado, el hecho de que un proceso se encuentre automatizado permite fabricar productos complejos en condiciones estables de calidad.

### 2.1 CONCEPTOS RELACIONADOS

Conviene ahora describir los términos utilizados en la instrumentación con el fin de emplear una terminología común y sin ambigüedades.

<sup>7</sup> Gamow, George; "Uno, dos, tres... infinito"; Espasa-Calpe; Argentina, 1948; p. 298

<sup>8</sup> Wilson, Jerry D.; "Física con aplicaciones"; Mc Graw Hill; 2ª edición; México, 1990; p. 1

Generalmente el proceso de medición implica la utilización de instrumentos que permitan obtener el valor de una variable. Cooper y Helfrick<sup>9</sup> opinan que los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas y en muchos casos permiten a las personas determinar el valor de una cantidad desconocida la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales. Ejemplos de lo anterior son el uso del microscopio electrónico para medir longitudes imperceptibles por el ojo humano, la medición de la frecuencia de una señal electromagnética y la medición de la temperatura ya que, aunque se puede sentir con la piel, no somos capaces de dar una medida objetiva ni exacta. Resumiendo, un **instrumento** es un dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable.

La **exactitud** de un instrumento indica la desviación de la lectura respecto de una entrada conocida o al valor real de la variable medida; es común expresar la exactitud como un porcentaje de la lectura de la escala completa. A la diferencia algebraica entre el valor leído por el instrumento y el valor real de la variable se conoce con el nombre de **error**.

La **precisión** es la tolerancia de medida o de transmisión de un instrumento (intervalo donde es admisible que se sitúe la magnitud de la medida), y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un periodo determinado. En otras palabras es una medida del grado con el cual las mediciones sucesivas de una magnitud fija varían una de otra. Se expresa normalmente como un porcentaje de la escala completa o directamente en unidades de la variable medida.

**Sensibilidad** es la relación de la señal de salida o respuesta del instrumento respecto al cambio de la entrada o variable medida, es decir, la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona. Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida.

**Resolución** es el cambio mínimo de la entrada o la variable medida para el cual se obtiene un cambio en la salida o lectura.

Finalmente, la **histéresis** se refiere a la diferencia en la salida para una misma entrada, según la dirección en que se alcance. Es decir, puede suceder, análogamente a la magnetización de los materiales ferromagnéticos, que la salida correspondiente a una entrada dependa de si la entrada previa fue mayor o menor que la entrada actual.

Estos son algunos de los conceptos principales que se utilizan cuando hablamos acerca de los instrumentos de medición. A continuación se mencionan las partes que componen a un sistema de instrumentación y ahí se harán algunas otras descripciones según sea necesario.

## 2.2 PROCESO DE MONITOREO

Se puede afirmar que el objetivo de los sistemas de instrumentación es, finalmente, proveer información acerca de distintas variables de interés en distintos procesos y, en algunos casos, controlar algunas otras mediante diversos mecanismos.

Los sistemas de instrumentación son procesos de monitoreo de variables en los cuales se pueden distinguir tres etapas distintas: la entrada, el acondicionamiento y la salida.

<sup>9</sup> Cooper, William; Helfrick, Albert; "Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición"; Prentice -Hall; México, 1991; p. 1

En la primera etapa, conocida también como etapa de detector-transductor, se encuentran los dispositivos que permiten medir directamente la variable física de interés, y realizan una transformación mecánica o eléctrica para convertir la señal en una forma más práctica.

En la segunda etapa, la intermedia, se encuentran dispositivos que se encargan de acondicionar la señal transducida mediante amplificación, filtración u otro tipo de modificación, de manera que pueda ser empleada en la tercera etapa.

Finalmente, en la etapa de salida, se encuentran componentes que indican, registran o controlan a la variable medida. Estos componentes pueden ser medidores indicadores, osciloscopios o registradores para presentación visual, también se puede tratar de dispositivos para almacenamiento de datos o de una computadora para la manipulación de la información o para poner en práctica un sistema de control.

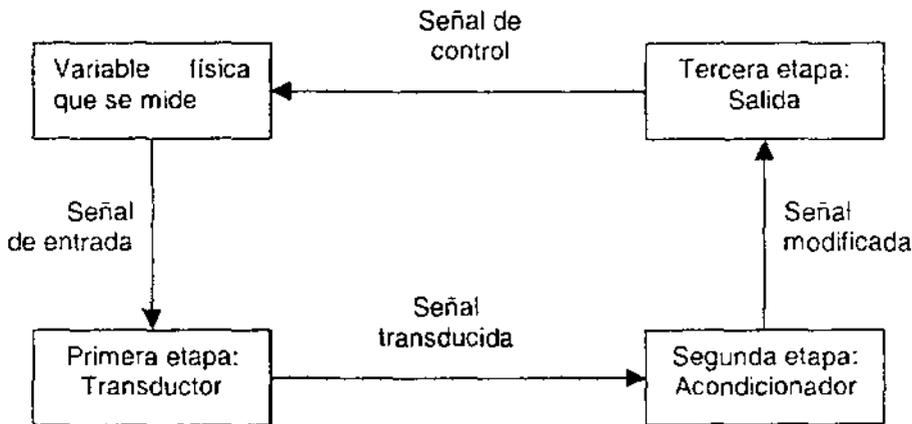


Figura 2.1 - Etapas de un sistema de instrumentación

La variable de entrada en la mayoría de los sistemas de instrumentación no es eléctrica. Con el fin de poder manipular de manera más cómoda las señales y utilizar métodos eléctricos para su manipulación, se prefiere que todas las cantidades no eléctricas se conviertan a señales eléctricas. Para ello es que se emplea el **transductor**, que es un dispositivo que al ser afectado por la energía de un sistema de transmisión, proporciona energía en la misma forma o en otra a un segundo sistema de transmisión. Cabe hacer notar que esta definición general, deja abierta la posibilidad para que el tipo de energía tanto de entrada como de salida pueda ser eléctrica, mecánica, química, térmica, etc.

En este punto conviene explicar las distintas clases de instrumentos que existen según la función que realizan dentro del sistema.

Los **elementos primarios** son aquellos que están en contacto directo con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable física de interés. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc.

Los **transmisores**, captan el valor de la variable física de interés a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática o electrónica.

Los **convertidores** son aparatos que reciben una señal de entrada neumática o electrónica procedente de un instrumento y la modifican para dar una salida normalizada. La normalización de estas señales es: para las eléctricas de 4 a 20 mA de corriente

continua, con lo que la señal puede recorrer de 2 a 3 km sin retraso ni atenuación significativos, y para las neumáticas, de 3 a 15 libras por pulgada cuadrada, con lo que el aire puede recorrer aproximadamente 100 m sin problemas<sup>10</sup>.

Como se puede notar, los tres tipos anteriores de instrumentos entran dentro de la definición de transductores y se pueden considerar como tales.

Los **receptores**, reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada, que actúan sobre el elemento final de control.

Los **controladores**, comparan la variable controlada con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

El **elemento final de control** recibe la señal del controlador y modifica al agente de control. Estos elementos son, en su mayoría, válvulas controladas por servomotores que restringen el paso de algún fluido.

Otra manera de clasificar a los instrumentos es de acuerdo con la variable que miden. Este punto se trata en la siguiente sección.

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

De acuerdo con la variable del proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc.

Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de variable que se mide y es independiente del número y tipo de transductores existentes entre el elemento primario y el instrumento final. A continuación se da una descripción de los instrumentos según esta clasificación:

### 2.3.1 De presión

La medida de presiones en líquidos o gases es una de las más frecuentes, particularmente en control de procesos. Los instrumentos que sirven para medir la presión se pueden clasificar, principalmente, en dos grandes grupos: los instrumentos mecánicos y los electromecánicos.

Dentro de los instrumentos mecánicos de presión, es decir, aquellos cuya salida no se encuentra en el campo eléctrico, se encuentran dos tipos de instrumentos:

- Los que miden la presión de manera directa comparándola con aquella ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas. Ejemplos de estos instrumentos son: el manómetro de tubo en U, el manómetro de tubo inclinado y el barómetro.
- Los que miden la presión a través de elementos elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen. Ejemplos de estos instrumentos son: El tubo Bourdon, el diafragma y el muelle.

---

<sup>10</sup> Luque Luna, Alberto; "Instrumentación, control y su aplicación a una planta de vapor"; Tesis Licenciatura, UNAM, Facultad de Ingeniería; México, 1979

Así, en el manómetro de tubo en U, la diferencia de la presión entre la presión desconocida  $p$  y la atmosférica  $p_a$  se establece como una función de la altura diferencial  $h$ . La densidad del fluido que transmite la presión es  $\rho_f$  y la densidad del fluido en el manómetro se indica como  $\rho_m$ . Un equilibrio de presión de las dos columnas dicta que:

$$p_a + \rho_m gh = p + \rho_f gh$$

de donde:

$$p = p_a + (\rho_m - \rho_f)gh$$

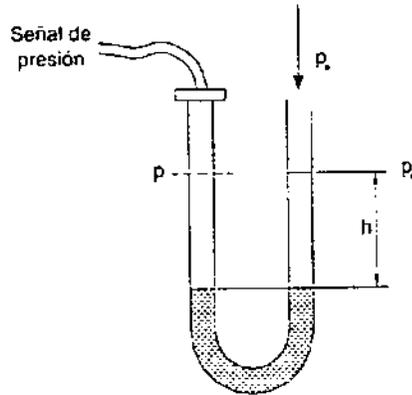


Figura 2.2 - Manómetro de tubo en U

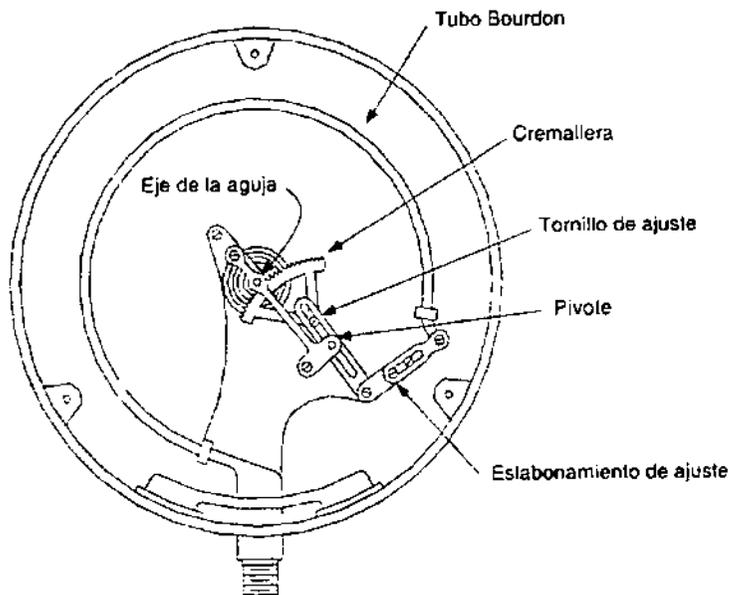


Figura 2.3 - Manómetro con tubo Bourdon

Ese es el principio básico de operación de todos los instrumentos de medición de presión en forma directa. Dentro de los instrumentos que incluyen elementos elásticos, el más conocido es el tubo de Bourdon, desarrollado por Eugene Bourdon en 1849, consiste en un tubo metálico de sección transversal no circular, obtenido a base de aplanar un tubo de sección circular, que tiende a recuperar dicha forma cuando se aplica una diferencia de presión entre el interior y el exterior. Si se ciega el tubo por un extremo y se empotra rigidamente el otro, esta tendencia a recuperar la sección transversal provoca un desplazamiento del extremo libre.

El manómetro de tubo en U se puede utilizar en conjunto con otros dispositivos para medir otras variables físicas. Por ejemplo, la velocidad del flujo de un fluido se puede medir con ayuda de un tubo de Pitot o un tubo venturi, que se basan en la medida de presiones diferenciales, pero eso se verá más adelante en la sección de los instrumentos de caudal.

Un diafragma es una placa circular flexible consistente en una membrana tensa o una lámina empotrada que se deforma bajo la acción de la presión o diferencia de presiones a medir. La transducción se realiza entonces detectando el desplazamiento del punto central del diafragma, su deformación global o la deformación local.

Si el desplazamiento obtenido mediante un simple diafragma no es suficiente, se pueden emplear fuelles, que son cámaras flexibles con elongación axial, que ofrecen una deflexión de hasta un 10% de su longitud. Pero son sensibles a vibraciones y aceleraciones y no resisten presiones muy altas.

Por su parte, los instrumentos electromecánicos, utilizan uno de los elementos mecánicos elásticos descritos anteriormente, pero en combinación con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico, puede ser, por ejemplo, un tubo Bourdon que, a través de un sistema de palancas, convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico. Los elementos electromecánicos se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos:

- Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas
- Resistivos
- Magnéticos
- Capacitivos
- Extensométricos
- Piezoeléctricos

En todos ellos, lo que se hace es colocar un elemento móvil unido al elemento elástico, de manera que al desplazarse provoque alguna modificación de tipo eléctrico, que pueda ser detectada por los instrumentos adecuados. Ejemplo de lo anterior puede ser un brazo móvil conectado a un tubo Bourdon en un extremo y a un potenciómetro en el otro. De esta forma, la presión se detecta como la variación de una resistencia eléctrica.

También existen medidores de presión que no dependen de los elementos mecánicos pero que sí generan un efecto eléctrico. Tal es el caso de las galgas extensométricas, cuyo principio se basa en la variación de la resistencia de un conductor o semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. Este efecto se conoce como efecto piezorresistivo y fue descubierto por Lord Kelvin en 1856. Si se conoce la relación existente entre la deformación de un material y el esfuerzo que la provoca, a partir de la medida de los cambios de la resistencia se podrá conocer los esfuerzos aplicados y, por tanto, la presión.

Otro instrumento que cuyo principio está basado en las características eléctricas de los materiales es el manómetro Pirani. A bajas presiones, la conductividad térmica efectiva de los gases disminuye. El manómetro Pirani mide la presión mediante el cambio de conductancia térmica de un gas. Se construye colocando un filamento calentado eléctricamente en el interior de un bulbo lleno de gas con baja presión; la pérdida de calor del filamento depende de la conductividad térmica del gas y de la temperatura del filamento. Mientras más baja es la presión, más baja es la conductividad térmica y, por tanto, más alta la temperatura del filamento para determinada corriente que circule por él. A su vez, la temperatura del filamento se mide como un cambio en la resistencia del mismo.

### 2.3.2 De temperatura

Como se mencionó en la introducción del capítulo, los seres humanos somos capaces de percibir si un cuerpo está caliente o está frío. Sin embargo, no se puede dar una medida exacta ni objetiva de su temperatura. La medida de la temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el instrumento de medida y el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador, registrador o controlador necesarios. Todos estos factores permitirán la elección adecuada del sistema de medida que mejor se adapte a las condiciones en las cuales trabajará.

Los medidores de temperatura se basan en distintos fenómenos para su funcionamiento que van desde cambios mecánicos de la materia hasta efectos eléctricos u ópticos. De ahí que se tengan termómetros de vidrio, bimetálicos, termistores, termopares, pirómetros de radiación, termómetros de resistencia eléctrica, etc.

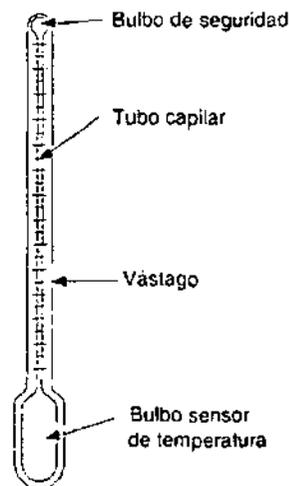


Figura 2.4 - Termómetro de vidrio

El termómetro de vidrio es uno de los tipos más comunes de dispositivos de medición de la temperatura. Consta de un depósito de vidrio con distintas secciones. Una de ellas es un bulbo relativamente más grande que contiene la mayor cantidad de líquido, el cual se expande cuando se calienta y sube por el tubo capilar en el cual está grabada una escala apropiada con marcas que permite una lectura de la temperatura. Los líquidos más usados para este tipo de termómetro son el alcohol y el mercurio.

El termómetro bimetalico se funda en el principio de la dilatación de los metales con la temperatura. El coeficiente de dilatación no es necesariamente el mismo para distintos metales, esto hace que al calentarse, algunos metales tengan un mayor incremento en su longitud que otros para un mismo incremento de la temperatura.

Si se obtiene una cinta bimetalica, con metales diferentes, y se somete a una temperatura diferente a la cual se hizo, la cinta se doblará en una u otra dirección dependiendo de si la temperatura es mayor o menor a la de fabricación. Generalmente, un extremo del termómetro bimetalico está fijo y el otro extremo está unido a alguna aguja indicadora que permita obtener una lectura de la temperatura sobre una carátula graduada.

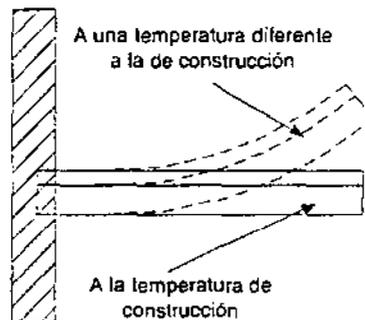


Figura 2.5 - Cinta bimetalica

El termómetro de bulbo y capilar es similar al tubo de Bourdon visto en los medidores de presión. Se trata de un bulbo que contiene algún fluido y que está conectado por medio de un capilar a una espiral. Cuando la temperatura del bulbo cambia, el gas o el líquido contenido en el mismo se expande y la espiral tiende a desenrollarse moviendo la aguja sobre la escala para indicar la variación de temperatura.

Aparte de los medidores de temperatura basados en fundamentos mecánicos, existen los que utilizan principios eléctricos. Estos son muy convenientes ya que proporcionan una señal que puede detectarse con facilidad y que puede ser amplificada para usarse con propósitos de control. Además, suelen ser bastante exactos si se calibran y compensan apropiadamente.

Los termómetros de resistencia utilizan algún tipo de elemento resistor que se somete a la temperatura que se desea medir. Generalmente se trata de un hilo conductor muy fino embobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica. El coeficiente de temperatura de resistencia del conductor, expresa la variación de la resistencia en ohms por cada grado que cambia la temperatura. Por lo

general la resistencia de los materiales que se emplean en este tipo de termómetros, es una relación cuadrática del siguiente tipo:

$$R = R_0(1 + aT + bT^2)$$

donde  $R$  = resistencia a la temperatura  $T$

$R_0$  = resistencia a la temperatura de referencia  $T_0$

$a, b$  = constantes determinadas experimentalmente

La medición de la resistencia puede ser realizada mediante algún método eléctrico como un puente.

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado, esto permite una variación muy rápida que sigue una curva exponencial, en contraste con el coeficiente positivo de la mayor parte de los metales que da lugar a una relación polinomial; por lo tanto, para un termistor:

$$R = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

donde  $R$  = resistencia a la temperatura  $T$

$R_0$  = resistencia a la temperatura de referencia  $T_0$

$\beta$  = constantes determinada experimentalmente

Además de ser un dispositivo muy sensible, el termistor es particularmente atractivo ya que permite compensar la temperatura de los circuitos eléctricos. Esto es posible debido al coeficiente negativo de temperatura, de modo que puede usarse para contrarrestar el aumento de resistencia de un circuito, conforme aumenta la temperatura.

Un elemento muy utilizado en la instrumentación para la medición de la temperatura es el termopar, que se basa en un efecto descubierto por Thomas J. Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes homogéneos cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura.

Esta circulación obedece a dos efectos combinados, el efecto Peltier, descubierto por Jean C. A. Peltier en 1834, que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson, descubierto por William Thomson (Lord Kelvin) en 1847-54, que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.

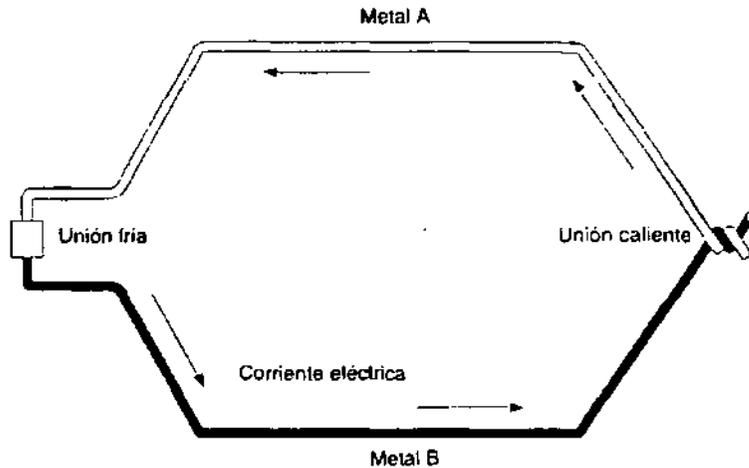


Figura 2.6 - Esquema de un termopar

El comportamiento de los termopares puede ser descrito mediante las siguientes 3 reglas:

- *Ley del circuito homogéneo.* En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.
- *Ley de los metales intermedios.* Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura A a otro punto B, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B.
- *Ley de las temperaturas sucesivas.* La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas  $T_1$  y  $T_3$  es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a  $T_1$  y  $T_2$  y de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas  $T_2$  y  $T_3$ .

Los termopares están hechos de materiales especiales ya que las uniones de los mismos deben tener las siguientes características: resistividad elevada para tener una resistencia alta sin requerir mucha masa, lo cual implicaría alta capacidad calorífica y respuesta lenta; coeficiente de temperatura débil en la resistividad; resistencia a la oxidación a altas temperaturas y la mayor linealidad posible.

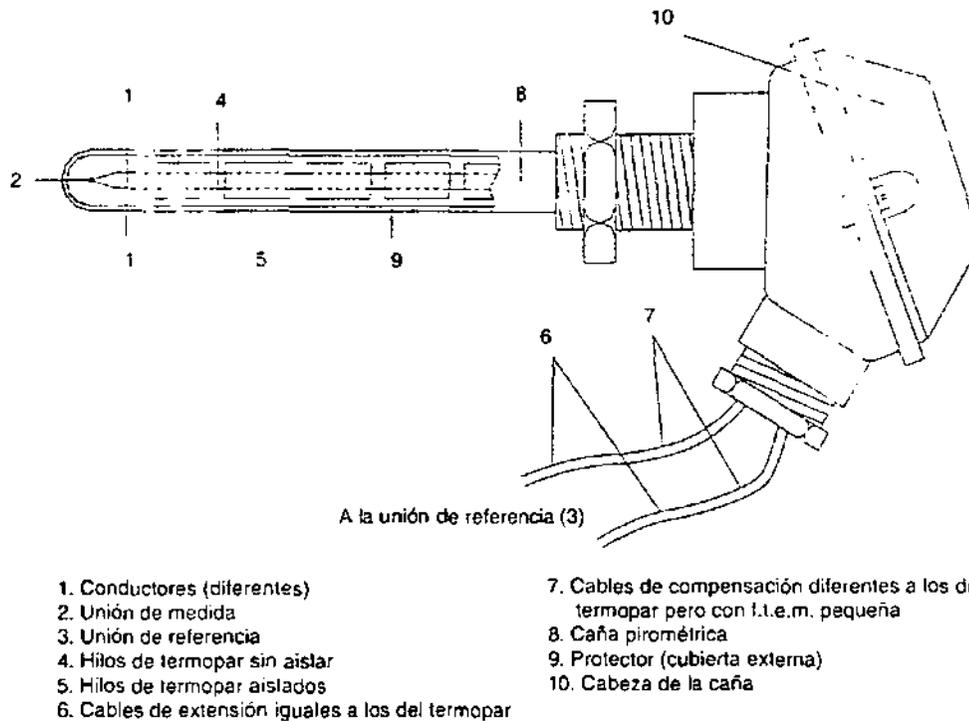


Figura 2.7 - Termopar industrial con vaina

Existen pues distintos tipos de termopares: Los tipo J son versátiles y de bajo costo. Se pueden emplear en atmósferas oxidantes y reductoras. Se aplican a menudo en hornos de combustión abiertos. Los termopares K se emplean en atmósferas no reductoras y, en su margen de medida son mejores que los de tipo E, J y T cuando se trata de medir en atmósferas oxidantes. Los termopares T resisten la corrosión, de modo que se pueden emplear en atmósferas de alta humedad. Los termopares tipo E son los de mayor sensibilidad y resisten la corrosión por debajo de 0°C y las atmósferas oxidantes. Los termopares N resisten la oxidación y ofrecen mejor estabilidad a altas temperaturas. Finalmente, los termopares con metales nobles (B, R y S) tienen muy alta resistencia a la oxidación y a la corrosión.

Para poder aplicar el efecto Seebeck a la medida de las temperaturas, es necesario mantener una de las uniones a una temperatura de referencia. La solución que se planteó originalmente era mantener dicha unión en hielo fundente a 0°C. Era una solución de gran exactitud y fácil instalación pero de difícil mantenimiento y alto costo. Actualmente se prefiere una compensación electrónica: Se permite que la unión de referencia sufra las variaciones de la temperatura ambiente, pero estas se detectan con otro sensor de temperatura que se coloca en la vecindad de la unión fría (de referencia), y se suma una tensión igual a la generada en la unión fría.

Finalmente se hará mención de uno de los dispositivos que se pueden encontrar comúnmente en el mercado para la medición de la temperatura. Se trata del pirómetro de radiación, que se funda en la Ley de Stefan-Boltzmann, que dice que la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo, aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Así, los pirómetros miden la temperatura de un cuerpo en función de la radiación que emite. Existen diferentes tipos de

pirómetros que se distinguen por la manera en la que captan la radiación; se puede encontrar pirómetros ópticos, infrarrojos, fotoeléctrico y de radiación total.

### 2.3.3 De caudal

En prácticamente todos los procesos industriales, se emplean flujos de líquidos o de gases, de los cuales se quiere conocer su gasto.

Además de la importancia que tiene el conocer el gasto de algún fluido, como herramienta de supervisión o para un posterior control del proceso. La medida del gasto es un importante indicador económico, pues casi siempre está relacionado con la eficiencia del proceso, además de que muchas veces, la sustancia que fluye es materia prima y representa un gasto dentro de la administración para las empresas.

Existen diferentes métodos para medir el flujo de fluidos. Uno de ellos está basado en la presión diferencial que se puede obtener colocando distintos elementos en la tubería conductora, ejemplo de esto son los siguientes aparatos: la placa con orificio, el tubo Venturi y el tubo de Pitot. El fundamento matemático de estos instrumentos es el teorema de Bernoulli, que se puede aplicar siempre y cuando se considere que el fluido es incompresible, que la gravedad es la única fuerza interna (lo cual implica que no hay fricción), que fluye en régimen estacionario y que no existe transferencia de calor ni del fluido ni hacia el fluido. Según este principio, todo cambio en la velocidad provoca un cambio en sentido opuesto en la presión.

En la placa de orificio, la obstrucción reduce el área transversal por la que pasa el fluido, lo cual, debido a la conservación de la masa, ocasiona una mayor velocidad del flujo y una menor presión en el fluido. Así, la medida del caudal, se reduce a una medida de la diferencia de presiones. Sin embargo, el resultado que se obtiene mediante este método no es muy exacto y es necesario aplicar un factor de corrección con un valor alrededor de 0.6<sup>11</sup>. En vez de la placa de orificio se puede utilizar una boquilla que funciona de manera similar.

En el tubo Venturi, sucede algo similar al fenómeno de la placa de orificio, sólo que permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa de orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga menor, de manera que el factor de corrección puede alcanzar valores como 0.97<sup>12</sup>. Sin embargo, el costo del tubo Venturi es mayor que el de la placa con orificio.

Para cualquiera de estos dispositivos, el caudal ideal sería:

$$Q_i = A_2 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho \left( 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)}}$$

<sup>11</sup> Pallás Areny, Ramón; "Sensores y acondicionadores de señal"; Marcombo; España, 1994; p. 38

<sup>12</sup> Idem., p. 39

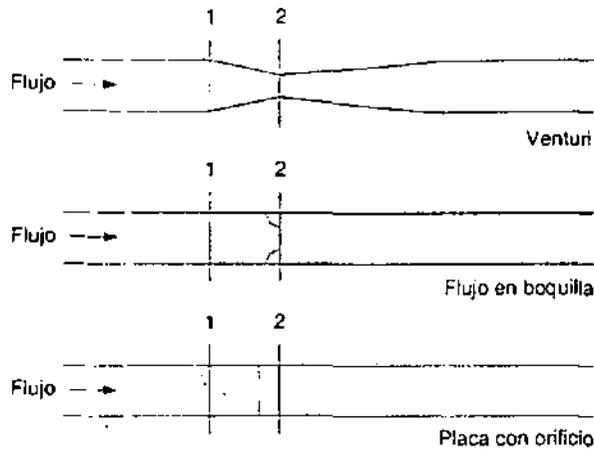


Figura 2.8 - Dispositivos para medir el flujo por diferencia de presiones

El tubo de Pitot, es un dispositivo que también mide el caudal a partir de la diferencia de presiones, en particular, la diferencia entre la presión total y la presión estática, esta diferencia da como resultado la **presión dinámica**, que es proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido. La ecuación correspondiente es:

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2}$$

donde:  $P_2$  = presión total en el punto donde el fluido anula su velocidad

$P_1$  = presión estática absoluta del fluido

$\rho$  = densidad

$V_1$  = velocidad del fluido en el eje de impacto

El tubo de Pitot también requiere un factor de corrección para tomar en cuenta aspectos como la fricción por la rugosidad de la tubería. Este instrumento es sensible a las variaciones en la distribución de las velocidades en la sección de la tubería, por lo que para lograr una mayor exactitud en la medida, es recomendable efectuar varias mediciones en puntos determinados y obtener un promedio de los resultados.

La diferencia de presión que se obtiene con los tres instrumentos anteriores puede ser medida con alguno de los instrumentos que se vieron en la parte correspondiente a medidores de presión, por ejemplo, se puede utilizar un tubo en U o con algún fuelle o diafragma que a su vez proporcionen una señal eléctrica.

Otro método para medir el gasto de un fluido, es el equilibrio de fuerzas entre el peso de un objeto y las fuerzas de arrastre y flotación del fluido. Se trata del rotámetro, que consiste en un tubo con conicidad uniforme colocado de manera vertical y un obturador ranurado, dispuesto en su interior, que es arrastrado por el fluido, a lo que se opone su peso. Si aumenta el caudal, el obturador se eleva de modo que el área de paso sea

mayor y la diferencia de presiones antes y después del mismo se mantenga constante. El desplazamiento del obturador indica así el caudal del fluido.

Si no se puede tener una lectura directa del flotador o se desea obtener una señal eléctrica, se pueden utilizar transductores eléctricos, por ejemplo, una varilla que sigue magnéticamente el movimiento del flotador y que mueve el brazo de un potenciómetro, con lo que se obtiene una variación resistiva proporcional al flujo del fluido.

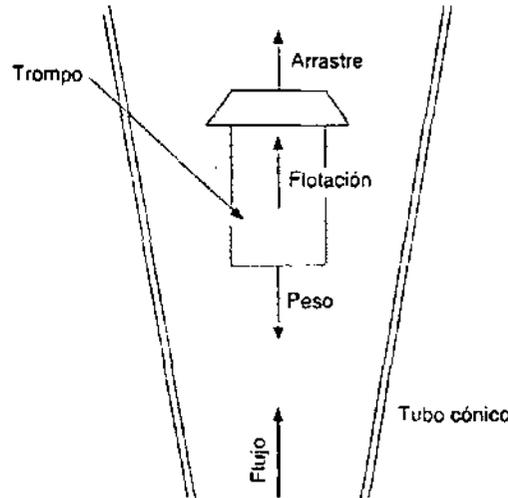


Figura 2.9 - Esquema de un rotámetro

Los medidores de caudal de desplazamiento positivo realizan la medición contando o integrando volúmenes separados de líquidos a través del tiempo. Existen diferentes tipos de estos instrumentos.

Un dispositivo típico es el de disco oscilante, el agua entra por un lado del medidor y choca contra el disco que se encuentra colocado de manera excéntrica. Con objeto de que el fluido se mueva por el medidor, el disco comienza a oscilar y su movimiento se transmite a un tren de engranes que accionan un registrador mecánico.

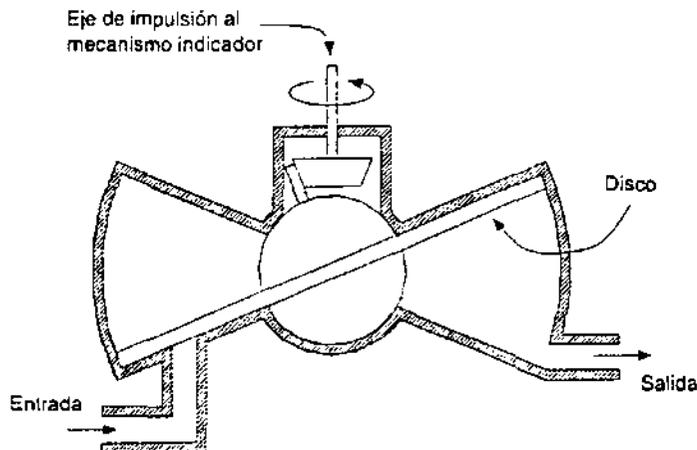


Figura 2.10 - Medidor de flujo de disco oscilante

Otro dispositivo es el medidor de aspas rotatorio. Las aspas están cargadas con resorte, de modo que mantienen contacto continuo con el cuerpo del medidor. Se encierra una cantidad fija de fluido en cada sección conforme el tambor excéntrico gira; este fluido finalmente sale del medidor y un registrador conectado al eje del tambor excéntrico indica el volumen del fluido desplazado.

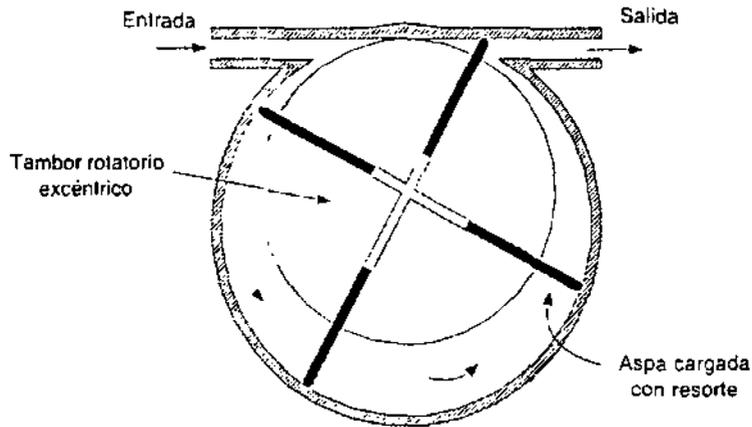


Figura 2.11 - Medidor de flujo de aspas rotatorias

Uno más de los medidores de desplazamiento positivo es el medidor rotativo cicloidal, que puede utilizarse para la medición de flujos de líquidos o de gases. Este contiene dos lóbulos de tipo Root engranados entre sí que giran en direcciones opuestas, manteniendo una posición relativa fija y desplazando un volumen fijo de fluido en cada revolución. Así, el número de revolución de los rotores es un indicador del flujo volumétrico.

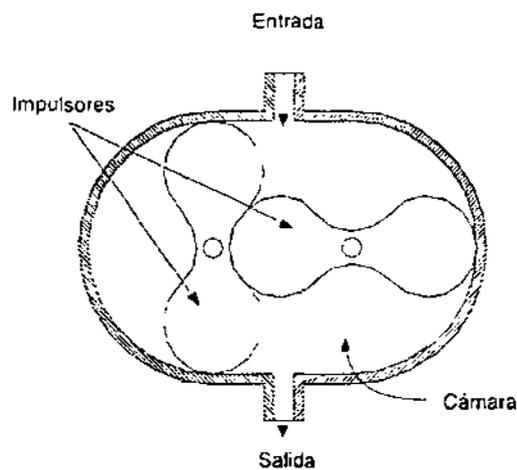


Figura 2.12 - Medidor de flujo con lóbulos impulsores

También existen dispositivos basados en principios térmicos para medir el flujo de un fluido y que proporcionan una salida eléctrica.

Uno de ellos se conoce como medidor Thomas y consta de una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona calor constante en un punto del conducto por el que circula el fluido. En puntos equidistantes a la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura. Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es idéntica en las dos sondas, pero cuando el fluido circula, transporta una cantidad de calor y se presenta una diferencia de temperatura en las sondas que aumenta progresivamente con el incremento del caudal y que puede ser medida mediante un puente eléctrico.

Otro dispositivo con principio térmico es el anemómetro de hilo caliente. En este se calienta un hilo muy fino haciendo circular una corriente a través de él y se coloca en la corriente del flujo. La transferencia de calor del hilo hacia el fluido depende de la corriente eléctrica que circule por este último y de la resistencia eléctrica que ofrezca, así como de la velocidad del fluido. De manera que si se conoce la corriente que circula por el hilo y la resistencia que ofrece, medida mediante un puente eléctrico, se puede determinar la velocidad del fluido y, en consecuencia, el gasto.

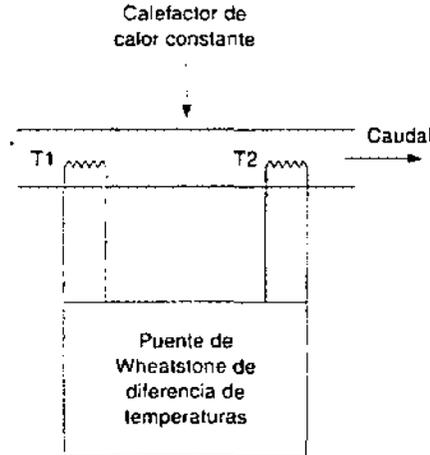


Figura 2.13 - Medidor Thomas

## 2.4 SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

Como se vio en el capítulo correspondiente al análisis del problema, todas las variables que necesitamos para poder calcular la eficiencia del proceso se restringen a 2 tipos, o son de presión o son de temperatura.

### 2.4.1 De presión

Para medir la presión, se eligió un tipo de sensor que emite un pequeño voltaje proporcional a la presión que mide. Motorola cuenta con una familia de productos para este efecto. Un ejemplo de ello es el sensor de presión MPX2200, se trata de un sensor basado en el efecto piezorresistivo que puede medir presiones diferenciales de hasta 200kPa con una salida máxima de 40mV.

En el primer capítulo se vio que al menos la mitad de las entradas de presión, caen por debajo de los 100kPa, por lo que este sensor es adecuado para esos puntos.

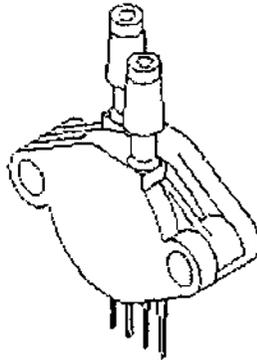


Figura 2.14 – Sensor de presión MPX2200 de Motorola

Existen sensores que se pueden utilizar en caso de presiones más altas. En el mercado existen de muy diversos tipos y los precios varían según características particulares del rango de medición que tienen, las condiciones bajo las que pueden operar y la exactitud en la medición.

Por ejemplo, el sensor de Motorola MPX5999D, tiene un rango máximo de medición de 1000kPa. Que aún no es suficiente para algunos de los puntos de medición del ciclo combinado, que llegan hasta 3000kPa. En estos casos se puede emplear sensores como los sensores EPXT de la marca Entran, que pueden medir presiones de hasta 100MPa y trabajar en ambientes corrosivos y de alta temperatura.

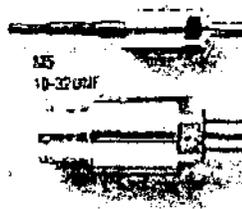


Figura 2.15 – Sensor de presión Entran serie EPXT

#### 2.4.2 De temperatura

Para la temperatura se emplearía al termopar como instrumento de medición, pues son particularmente aplicables cuando las distancias de transmisión son largas, cuando se requiere una respuesta sensible y rápida y cuando las temperaturas son altas.

La selección del termopar depende de la gama de temperatura, de la exactitud deseada y de la naturaleza de la atmósfera en la cual va a estar expuesto. El Laboratorio de Máquinas Térmicas cuenta ya con un termopar, pero desconoce el tipo del mismo, a

juzgar por el color (cables dorado y plateado cubiertos por plástico azul y rojo y aún por una protección exterior de color azul), parecería ser cobre-constantán. Para evitar confusiones, fue preciso realizar un experimento con el fin de caracterizar el comportamiento del termopar: Se introdujo el termopar en un recipiente con agua a temperatura ambiente, y luego el agua se calentó hasta el punto de ebullición y se dejó enfriar. Durante este proceso se tomaron lecturas de la temperatura del agua con un termómetro digital y del voltaje de salida en el termopar con un multímetro digital. El experimento se repitió 5 veces. Los datos obtenidos fueron comparados con las tablas de una de las referencias bibliográficas<sup>13</sup> resultando similares a los que se presentan para el termopar de cobre-constantán, cuya curva característica es la siguiente:

$$E = \sum_{i=0}^8 b_i t^i$$

donde:

- E - es el voltaje de salida en microvolts
- t - es la temperatura de la unión caliente del termopar
- b<sub>i</sub> - son los coeficientes de los términos del polinomio como sigue:
  - b<sub>0</sub> = 0
  - b<sub>1</sub> = 3.874 077 3840 x 10
  - b<sub>2</sub> = 3.319 019 8092 x 10<sup>-2</sup>
  - b<sub>3</sub> = 2.071 418 3645 x 10<sup>-4</sup>
  - b<sub>4</sub> = -2.194 583 4823 x 10<sup>-6</sup>
  - b<sub>5</sub> = 1.103 190 0550 x 10<sup>-8</sup>
  - b<sub>6</sub> = -3.092 758 1898 x 10<sup>-11</sup>
  - b<sub>7</sub> = 4.565 333 7165 x 10<sup>-14</sup>
  - b<sub>8</sub> = -2.761 687 8040 x 10<sup>-17</sup>

Este tipo de termopar resulta adecuado para la instrumentación del ciclo combinado, al menos en los lugares en donde se desea tomar la temperatura, ya que el rango de operación recomendado para un termopar cobre-constantán es de -184 a 400 °C<sup>14</sup>. Para aquellos lugares en donde la temperatura excede el límite de este tipo de termopar, se recomienda el uso del termopar tipo K (Cromel-Alumel), cuyo límite máximo de operación es de 1300 °C.

Sin embargo, tal como se mencionó más arriba, los termopares necesitan ser compensados por temperatura, para lo cual se necesita un dispositivo que nos proporcione la temperatura a la cual se encuentra la unión fría del termopar. El circuito empleado para este fin es el LM35, que es un sensor de temperatura electrónico con un rango de 0 a 50°C, proporcionando una salida lineal de 10mV por cada grado centígrado.

<sup>13</sup> Creus, Antonio; "Instrumentación y control"; Alfaomega-Marcombo; 6ª ed.; México, 1998; cap. 6

<sup>14</sup> Pallás Areny, Ramón; "Sensores y acondicionadores de señal"; Marcombo; España, 1994; p. 278

Ahora que se conocen los instrumentos que se utilizarán para medir las variables físicas de interés, se explicará la propuesta que se tiene para recopilar dicha información y transmitirla a la computadora.

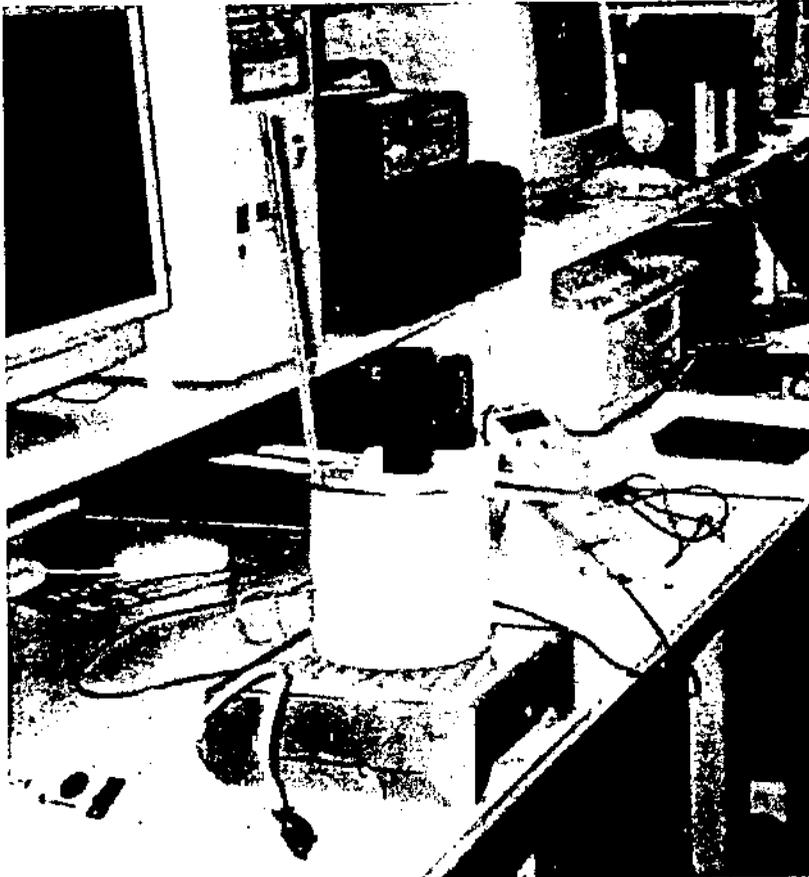


Figura 2.16 – Pruebas de calibración para el termopar

### Capítulo III

## ADQUISICIÓN DE DATOS

Los avances tecnológicos se reflejan en muy distintas áreas de nuestra vida diaria. Ejemplo de ello son los aparatos de sonido y video que utilizan tecnología láser, los sistemas de posicionamiento global que se emplean en los automóviles y los teléfonos celulares capaces de conectarse a la Internet y permitirnos revisar el correo electrónico.

De la misma manera, la industria y, consecuentemente, el mercado, se han visto afectados por la tecnología. Todo ello enfocado a tener mejores procesos productivos con resultados fiables, así es como "la electrónica de potencia, los robots, el control inteligente y la conectividad se están convirtiendo en los pilares de la electrónica industrial y la automatización de las industrias"<sup>15</sup>.

Por supuesto, lo anterior afecta a distintos sectores. Uno de ellos y que es el que aquí nos corresponde abordar, es el de la medición. Según un artículo de la revista Spectrum<sup>16</sup>, pocas veces un gran segmento de la tecnología se mueve en una sola dirección y esto es lo que ha venido sucediendo con la industria de la medición en los últimos años, de manera que ha ganado lugar en prácticamente cada uno de los rincones de la industria. Desde proveedores de servicios de telecomunicaciones hasta plantas de productos químicos han hecho una prioridad dentro de sus empresas la existencia de todo tipo de instrumentos de medición, desde instrumentos portables hasta equipo de pruebas automatizado.

Debido a la importancia que de contar con sistemas que permitan un mejor control y supervisión de los procesos, el presente trabajo da una muestra de lo que se puede lograr al integrar distintas ramas de la ingeniería con un mismo propósito. En este caso se trata de diseñar una herramienta que permita el monitoreo de un proceso de generación de potencia.

Lo anterior se puede lograr mediante un diseño adecuado que permita la recolección de datos mediante distintos instrumentos capaces de generar una señal eléctrica, misma que será transmitida y acondicionada hasta el lugar físico en donde se encuentre el medio, que permita interpretar y monitorear dichas señales. Para el caso particular se ha pensado en el empleo de una computadora personal como el elemento final que permita ver al usuario las condiciones de operación del proceso de generación de energía.

El esquema general de funcionamiento de un sistema cualquiera es, obtener información de alguna fuente y trabajar después con ella para dar un resultado. Precisamente, a lo largo del presente capítulo, se explicará la manera en la que se adquirirán los datos necesarios para completar la tarea propuesta en esta tesis. Se mostrará primero el sistema a utilizar para la selección de las señales externas tomadas del proceso termodinámico y el posterior envío a la computadora, que consiste en una tarjeta llamada de adquisición de datos; además, se expondrán los circuitos necesarios para el

---

<sup>15</sup> "Technology 1999, analysis and forecast: Industrial electronics"; Gadi Kaplan; Spectrum; IEEE; Enero de 1999; p. 68

<sup>16</sup> "Technology 1999, analysis and forecast: Test and measurement"; C. G. Masi; Spectrum; IEEE; Enero de 1999; p.p. 92-97

acondicionamiento de dichas señales, acondicionamiento que será necesario entre los instrumentos de medición y la tarjeta de adquisición de datos.

### 3.1 INTERFAZ ENTRE EL ENTORNO Y LA COMPUTADORA

Tradicionalmente se piensa en las computadoras como una herramienta que permite hacer cálculos matemáticos complejos, diseñar algún plano o escribir un documento; más recientemente ha tomado importancia como un medio para automatizar labores de oficina y para navegar por la Internet. Sin embargo, existe un campo mucho más vasto de aplicaciones.

La conectividad de una computadora con el mundo real abre una gran cantidad de opciones para su utilización. De hecho, los sistemas que permiten a una computadora conectarse con el mundo real se pueden dividir en tres tipos<sup>17</sup>:

- **Recolección de datos y monitoreo.** Son los sistemas que sólo cuentan con entradas provenientes del mundo real. Todas las salidas son dirigidas a los periféricos tradicionales de una computadora como los monitores o las impresoras.
- **Estimulación y anuncio.** Se trata de sistemas que sólo tienen salidas hacia el mundo real y toman las entradas de periféricos como el teclado.
- **Control en línea.** Estos sistemas, tienen tanto entradas provenientes de, como salidas hacia el mundo real y cualquier otro periférico. Estos sistemas a su vez se pueden dividir de acuerdo con tres factores:
  - Control analógico o digital
  - Ciclo cerrado o abierto
  - Operación en tiempo real

En el presente trabajo se utilizará el primer sistema descrito, ya que, precisamente, se trata del diseño de un sistema capaz de recoger datos de distintos sensores y mostrar sus respectivos valores en la pantalla de la computadora con el fin de monitorear el proceso.

Todo lo anterior se logra mediante una adecuada interfaz con la computadora. Sin embargo, hasta el momento no hemos definido lo que se entiende por interfaz. Pero antes de eso se mencionaran los pasos que de manera general deben seguir las señales desde que se obtienen a partir del mundo real y hasta que salen de nuevo a él.

#### 3.1.1 Recorrido de las señales

Se ha mencionado que las señales que se pretende manejar mediante la computadora, deben ser tomadas a partir del mundo real. A partir de ahí, y según se vio en el segundo capítulo, existe una gran variedad de transductores para recoger las señales directamente del medio que nos atañe. Los transductores leen la señal (que por lo general es analógica) y generan una salida que puede ser bien digital, bien analógica. Para el segundo caso, será necesario que después de la salida del transductor se coloque un elemento que permita convertir la señal analógica en digital.

Estas señales, siendo digitales, pueden ser o no estandarizadas. Si no lo son, conviene emplear alguna interfaz de hardware para colocarlas dentro de los estándares establecidos para la conexión con la PC. Una vez que todas las señales están

<sup>17</sup> Cripps, Martín; "Computer Interfacing"; Edward Arnold; Gran Bretaña, 1989; p. 3

estandarizadas, pueden entrar, a través de una interfaz estándar, hacia el bus de la PC, que es por donde fluye la información.

Una vez ahí, el microprocesador y los demás componentes de la computadora tendrán la capacidad de manipular la información recibida y de generar una salida digital.

Esta salida es puesta en el bus de la PC y tomada por la interfaz estándar de salida, a partir de aquí se llevan a cabo los pasos iniciales, pero de manera inversa. Es decir, primero se acondicionan las señales para poder ser utilizadas por el siguiente dispositivo, que son los elementos de control. Pero antes de que la señal llegue a los elementos de control, habrá que revisar de qué tipo son: analógicos o digitales. En el primer caso, será necesario que la señal pase a través de un convertidor digital a analógico. Finalmente, los elementos de control (o de salida) actuarán sobre el mundo real produciendo ciertas modificaciones. El siguiente esquema muestra los pasos descritos arriba.

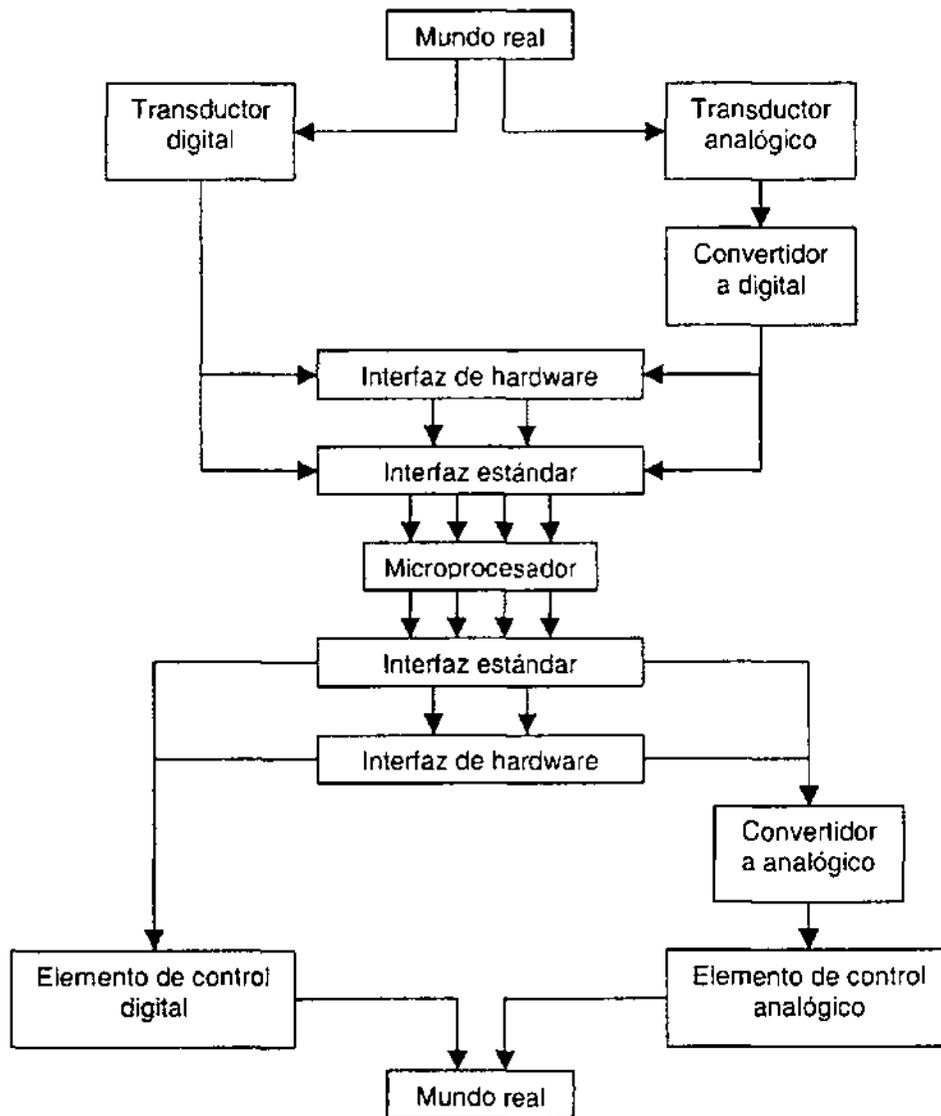


Figura 3.1 – Flujo de señales en un sistema de control

### 3.1.2 La interfaz y sus tipos

Una vez que todas las señales se encuentran en forma digital, se deben conectar a la computadora para poder leerlas. El punto de conexión es lo que se conoce de manera tradicional como la **interfaz**.

En términos más amplios, una interfaz es la frontera que existe entre un elemento de control y uno o varios elementos que se conectan a este y que pueden o no incluir lógica de control, por ejemplo, un transductor, un periférico cualquiera u otro microprocesador.

Una interfaz es la definición de las propiedades lógicas, físicas y eléctricas de la frontera e incluso se extiende hasta los protocolos de transmisión, ya que actualmente cualquier interfaz es el resultado de la combinación de software y hardware.

De hecho, el balance entre software y hardware en una interfaz se puede variar dependiendo de las necesidades, ya sea para dar mayor velocidad en la operación o para reducir el costo de la conexión.

Existen principalmente 2 tipos de interfaz para la conexión de la computadora con el mundo real. La interfaz serial y la paralela.

Para poder transmitir una palabra de cierto número de bits, desde o hacia la computadora, se puede utilizar tanto la transmisión serial como la transmisión en paralelo. La diferencia principal radica en que mientras la interfaz **paralela** dedica un solo hilo a cada bit de la palabra, en una interfaz **serial**, todos los bits son transmitidos a través de un solo cable y por convención, se envía primero el bit menos significativo de la palabra.

Cada método de transmisión tiene características que lo hacen atractivo. La transmisión en paralelo, tiene la ventaja de que se lleva a cabo de manera más directa que la serial y requiere menos hardware. Lo anterior debido a que se tienen por separado líneas para sincronización, control, datos, etc.

Sin embargo, para realizar una transmisión de datos a larga distancia es, precisamente, la gran cantidad de hilos que se utilizan en la interfaz paralela lo que hace que su costo se eleve. Es aquí donde entra el atractivo de la transmisión serial, pues ocupa pocos hilos (para la transmisión requiere únicamente un hilo, en oposición a los ocho hilos que generalmente se utilizan en la configuración en paralelo<sup>18</sup>). Además, la conexión en serie permite utilizar los servicios comerciales de comunicación como la línea de teléfono, sin embargo, la manera de operar resulta más complicada que la de la transmisión en paralelo debido a que las señales de control y sincronización emplean el mismo hilo que los datos.

## 3.2 MICROCOMPUTADORAS Y SISTEMAS INMERSOS

Es notorio que en estos días, las computadoras son utilizadas en muy diversos lugares: oficinas de gobierno, bancos, escuelas y el hogar, por mencionar algunos cuantos. Todas ellas hacen uso de algún microprocesador además de otros componentes electrónicos. Sin embargo, existen muchos otros sistemas que también utilizan algún procesador para realizar sus funciones, pero que no tienen la apariencia de una computadora. Estos sistemas son los sistemas inmersos, mejor conocidos por su nombre en inglés como *embedded systems*.

<sup>18</sup> Tompkins, Willis; Webster, John; "Interfacing sensors to the IBM PC"; Prentice Hall; Estados Unidos, 1988; p. 163

Ejemplos de sistemas con componentes inmersos son algunos hornos de microondas programables, los equipos de sonido con control remoto y maquinaria más complicada como equipo de refrigeración en la industria o alguna otra aplicación especial. La tarjeta de adquisición de datos que se presenta más adelante en el trabajo, puede considerarse como un sistema inmerso de propósito general.

El principio básico de operación así como los componentes que se utilizan, tanto de las microcomputadoras como de los sistemas inmersos es el mismo, son, de manera general, los mismos y es por eso que se presentan a continuación.

Las partes en que se puede dividir a una computadora (y con este término me permito englobar tanto a las microcomputadoras como a los sistemas inmersos), son 2 principalmente: la unidad central de proceso y las unidades de entradas-salidas.

### 3.2.1 Unidad central de proceso

Se conoce a veces con el nombre de procesador central. Comprende tres unidades de funcionamiento:

- **Memoria principal** – Es una unidad compuesta de celdas, donde cada una es capaz de almacenar un bit de información, que puede ser luego leído por la computadora. A la posición de la celda en la memoria principal se le llama dirección. El direccionamiento de una celda consiste, por tanto, en seleccionar dicha celda en la memoria para grabar o extraer la información que contiene. La información contenida en la memoria puede ser de dos tipos:
  - *Las instrucciones* (o información de tratamiento) y
  - *Los operandos* (o información que se procesa)
- **Unidad de control** – Está compuesta de circuitos lógicos y asegura la gestión general del funcionamiento de la unidad central de proceso. Esto lo logra mediante la manipulación de las instrucciones contenidas en la memoria. Para realizar sus funciones, la unidad de control cuenta con circuitos especiales:
  - *El contador de programa* o contador de instrucciones, que contiene la dirección de la nueva instrucción a ejecutar.
  - *El registro de instrucción*, que contiene la instrucción leída en la memoria principal.
  - *El decodificador de instrucción*, que analiza el código de la instrucción a fin de preparar la distribución de los diferentes controles elementales.
  - *El secuenciador*, que a partir de las señales de control elementales, libera salidas del decodificador de instrucción siguiendo el ritmo que marca el reloj.
- **Unidad aritmético-lógica** – Su trabajo es efectuar, bajo el control de la unidad de control, el proceso sobre los operandos de la memoria. Para realizar sus operaciones se apoya en los siguientes circuitos:
  - El circuito de cálculo, que permite realizar operaciones aritméticas y lógicas.
  - Los registros de trabajo, que contienen los operandos y los resultados. Se conoce como acumulador.

- o El registro de estado interno, refleja el estado del resultado de una operación aritmética o lógica que acaba de ejecutarse, como por ejemplo, si el resultado fue nulo, el signo, si es par o impar, si el resultado sobrepasa la capacidad de la longitud de información o si la operación lleva consigo un acarreo.
- o El puntero de pila, que permite generar las pilas de direcciones, esto es, una zona de palabras reservadas en la memoria principal que contienen direcciones.

### 3.2.2 Unidades de entradas-salidas

Se tienen dos categorías de unidades, a saber:

- **Unidades de interconexión** – Se encargan de manejar las transferencias de datos entre la unidad central de proceso y las unidades periféricas. Para realizar esto, se apoya en los siguientes circuitos:
  - o Un selector de periférico, que permite seleccionar, según los datos de la instrucción de entrada-salida, la unidad periférica utilizada.
  - o Un registro de dirección, que contiene la dirección de la memoria principal desde o hacia donde se efectúa la transferencia de información.
  - o Un contador de palabras, que permite contabilizar el número de datos que todavía faltan de transferir y parar la transferencia.
  - o Un registro de interconexión, que constituye el registro de transferencia de datos entre la unidad central de proceso y la unidad periférica.
- **Unidades periféricas** – También se conocen como unidades exteriores y permiten la comunicación con la unidad central de proceso. Los tipos principales de unidades periféricas son:
  - o Las memorias auxiliares, su capacidad es superior a la de la memoria principal. Un ejemplo son los discos duros.
  - o Las unidades de comunicación, que permiten el diálogo entre el usuario y el sistema informático. Ejemplos de ello son las impresoras, los monitores, el teclado, etc.

## 3.3 TARJETA DE ADQUISICIÓN

La tarjeta de adquisición de datos es una parte fundamental de este proyecto, ya que constituye la unidad que permite el intercambio de información entre la computadora y las señales provenientes del proceso.

Actualmente, este tipo de tarjetas tiene una gran aplicación en la industria, particularmente en lo que se refiere a la automatización de los procesos. No en vano, existen numerosas compañías que se dedican a fabricar y distribuir este tipo de productos como Gage Applied Sciences, Precision Micro Dynamics y National Instruments, por mencionar algunas. Las tarjetas que ofrecen pueden tener numerosas entradas y salidas tanto analógicas como digitales; además de tener una notable rapidez para la adquisición de datos que depende, por lo general, de los convertidores analógico-digitales. Todos estos productos son el resultado de un esfuerzo de los ingenieros de cada empresa por ofrecer una solución a los problemas de automatización en la industria, buscando también un beneficio económico para quien lo fabrica. Resulta interesante reconocer, que dichos

desarrollos tecnológicos pueden ser reproducidos en instituciones educativas como la nuestra si se dedica el suficiente tiempo y esfuerzo

La tarjeta que se presenta en esta sección, se desarrolló en el Laboratorio de Mecatrónica del Departamento de Mecatrónica de nuestra Facultad de Ingeniería, y es un ejemplo de los resultados que se pueden obtener en la investigación de sistemas mecatrónicos que, como menciona González Villela "tienen como propósito fundamental la automatización de los procesos"<sup>19</sup>.

Efectivamente, la tarjeta de adquisición de datos que se utiliza en el presente trabajo, es un sistema mecatrónico y como tal, debe tener una característica importante que obedece a una tendencia prevaleciente en estos días: la flexibilidad, esto es, la capacidad que tiene para adaptarse a un determinado proceso o a un cambio en el mismo. Así, la tarjeta puede considerarse como de propósito general, y en el caso particular será utilizada en un proceso termodinámico para el monitoreo de las variables que involucra, y la posterior determinación de su eficiencia.

Además, la tarjeta de adquisición de datos, puede considerarse como un sistema inmerso, de acuerdo con la descripción que se dio al principio del capítulo. Y como se verá más adelante, hace uso de un microcontrolador diseñado para funcionar dentro de este tipo de sistemas.

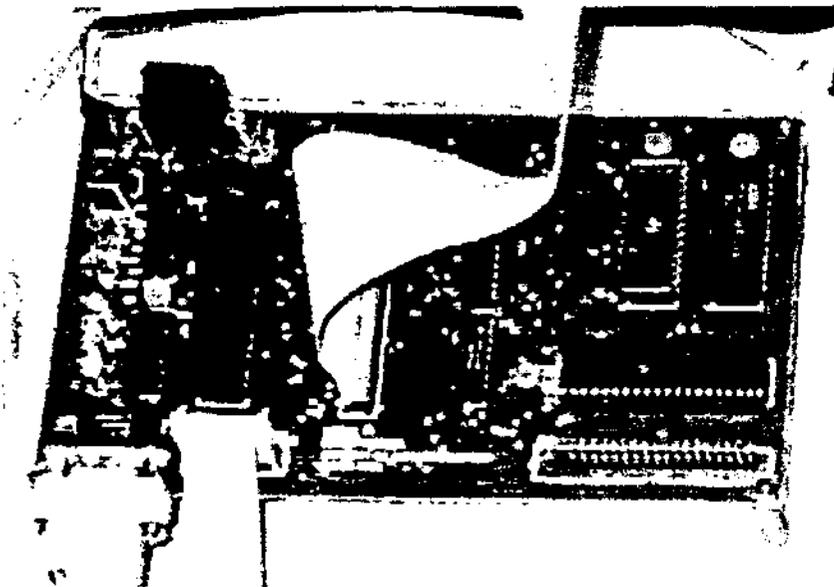


Figura 3.2 – Tarjeta de adquisición de datos

Los diagramas para la fabricación de la tarjeta (pistas y perforaciones) así como los diagramas eléctricos se encuentran en los apéndices de este trabajo.

<sup>19</sup> González Villela, Víctor; "Diseño Mecatrónico, guía de clase"; Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.; México, 1997; tema III, p. 1

### 3.3.1 Hardware y funcionamiento

Tanto el diagrama general de la tarjeta como el esquema de la disposición de sus elementos se pueden ver en el apéndice de este trabajo.

La composición de la tarjeta cumple con los puntos señalados en las primeras secciones de este capítulo, que hacen referencia a las microcomputadoras y los sistemas inmersos y a los componentes de una computadora. Por lo que en esta parte sólo se mencionaran las características particulares de la tarjeta de adquisición.

El microprocesador que se utiliza es uno de la familia de microcontroladores Intel®, el 8031AH. Esta es la versión sin ROM del 8051AH, que además tiene las siguientes características:

- CPU de 8 bits optimizado para el control de aplicaciones
- 128 bytes de memoria RAM interna
- 4 puertos de 8 bits para entradas y salidas
- 2 contadores de 16 bits
- 16 bits de direccionamiento
- 6 fuentes/5 vectores de interrupción con dos niveles de prioridad
- Oscilador interno
- Puede manejar hasta 64Kb de memoria de programa y 64Kb de RAM externa

En la siguiente figura se muestra el esquema del microcontrolador, para una mejor identificación de sus 40 terminales, 32 de las cuales corresponden a los 4 puertos de entradas y salidas, además de otras 8 terminales restantes. Todas estas se explican a continuación.

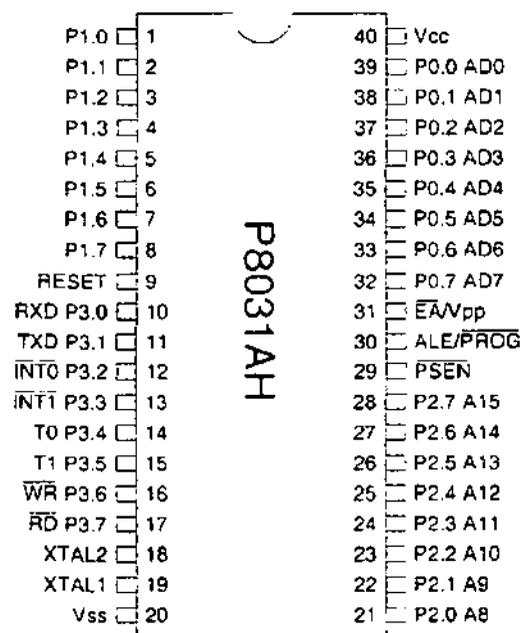


Figura 3.3 - Diagrama del microcontrolador 8031

**Puerto 0:** Debido a que las 8 líneas que componen este puerto se encuentran multiplexadas en tiempo, los bits P0.0 a P0.7 conforman tanto el bus de datos como la parte baja del bus de direcciones.

**Puerto 1:** Este se puede considerar como un puerto paralelo, ya que puede ser usado tanto de entrada como de salida.

**Puerto 2:** Se trata de un puerto bidireccional de 8 bits que contiene la parte alta del bus de direcciones.

**Puerto 3:** Este puerto contiene algunas funciones especiales del microcontrolador según se indica en la siguiente tabla

Terminal	Función
P3.0	RXD (Puerto de entrada serial)
P3.1	TXD (Puerto de salida serial)
P3.2	INT0 (Interrupción externa 0)
P3.3	INT1 (Interrupción externa 1)
P3.4	T0 (Entrada del contador externo 0)
P3.5	T1 (Entrada del contador externo 1)
P3.6	WR (Señal de escritura de datos externos)
P3.7	RD (Señal de lectura de datos externos)

Tabla 3.1 Funciones especiales del puerto 3

**Reset (RST):** Esta es la entrada del circuito restablecedor. Cuando permanece una señal alta en esta entrada durante dos ciclos de reloj, el microprocesador se reestablecerá.

**ALE/PROG:** Las siglas de esta terminal provienen del inglés Address Latch Enable, y es una señal de control que indica al circuito Latch la posibilidad de almacenar la parte baja del bus de direcciones, a fin de que el puerto 0 pueda ser utilizado como bus de datos.

**PSEN:** Es la señal de control que permite la lectura de código las memorias externas (Program Store Enable)

**EA/Vpp:** Esta terminal es la de acceso externo (External Access) y según el manual del fabricante<sup>20</sup> debe conectarse a tierra para poder traer código de cualquier memoria externa.

**XTAL1:** Entrada al amplificador inversor

**XTAL2:** Salida del amplificador inversor

Tanto XTAL1 como XTAL2 forma parte de un amplificador inversor del microprocesador que puede ser utilizado como un oscilador. Si se desea utilizar un oscilador externo, como

<sup>20</sup> Intel Corporation; "8-bit Embedded controller handbook"; Estados Unidos, 1990; p. 7-47

es el caso de nuestra tarjeta, la terminal XTAL1 debe ir a tierra y XTAL2 a la señal del oscilador externo. En el caso particular, se emplea un reloj de 8MHz.

Las 2 terminales restantes del microcontrolador son Vcc y Vss, que se conectan al voltaje de alimentación y a tierra respectivamente.

Dentro de la explicación de las terminales del microcontrolador, es fácil hacer notar, que ya se encuentran definidos los distintos buses de la tarjeta. El bus de direcciones cuenta con 16 líneas, 8 de las cuales (la parte baja) se manejan a través del puerto 0, mientras que las 8 restantes (parte alta) se manejan mediante el puerto 2.

El bus de datos, se encuentra conformado por 8 líneas, también manejadas a través del puerto 0. Finalmente, el bus de control está constituido por 4 señales principales mencionadas con anterioridad: ALE, PSEN, RD y TX.

Otra parte importante son los puertos de comunicación. El puerto serial, es el que permitirá a la tarjeta de adquisición de datos comunicarse con la PC; para ello, la tarjeta cuenta con un chip que se encarga de hacer la conversión de los niveles lógicos para la interfaz RS-232. El microprocesador 8031AH cuenta con un registro llamado SBUF (Serial Buffer), que es donde se coloca la palabra que se transmite mediante el puerto serial. Al colocar una palabra ahí, la transmisión comenzará automáticamente; por otro lado, los datos que se reciban mediante el puerto serial, aparecerán en ese mismo registro.

Por lo que respecta a los puertos paralelos, ya se vio que el puerto 1 del microprocesador puede ser utilizado como tal, pero además, la tarjeta cuenta con un chip que se encarga de controlar un puerto externo paralelo de hasta 24 líneas de entrada/salida. Este chip (8255) puede manejar hasta 3 puertos de 8 bits y su acceso se realiza de manera similar al de las memorias externas, tomando la información del bus de datos.

Una parte importante para entender el funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos es el mapa de memoria. La tarjeta cuenta con una memoria externa para programa que es una ROM 2764 que abarca desde la dirección 0000h hasta la 1FFFh, dejando libre el rango de la dirección 2000h hasta la FFFFh. También cuenta con una memoria externa para datos, la RAM 2864 con un rango de 0000h a 1FFFh y el puerto de entrada/salida mencionado anteriormente, el puerto paralelo 8255 que abarca las direcciones E000h a E003h, pues como se mencionó, los puertos son manejados como localidades de memoria. Por otro lado, la memoria RAM interna está dividida en dos partes, la memoria de Propósito General y la memoria de Registros de Funciones Especiales (SFR – Special Function Register).

El rango de direcciones 00h a 7Fh, que es el de propósito general está dividido en 4 áreas:

- El banco de registros: Son cuatro 4 bancos de 8 registros cada uno que se conocen con el nombre de R0 a R7, dos bits en el registro de estado permiten seleccionar a cada uno de estos bancos. Ocupan las direcciones 00h a 1Fh.
- Registros direccionables por bit: Son los registros correspondientes del 20h al 2Fh.
- Registros de propósito general: Se ubica en la parte alta de la memoria interna, ocupando las direcciones 30h a 7Fh.

El área destinada al SFR, ocupa las direcciones 80h a FFh de la memoria interna. No todos los registros están ocupados, pero los que lo están tienen alguna función en particular. Aquí se encuentran, por ejemplo, los estados de cada uno de los puertos del microprocesador, el búfer del puerto serial, el acumulador, los contadores, etc.

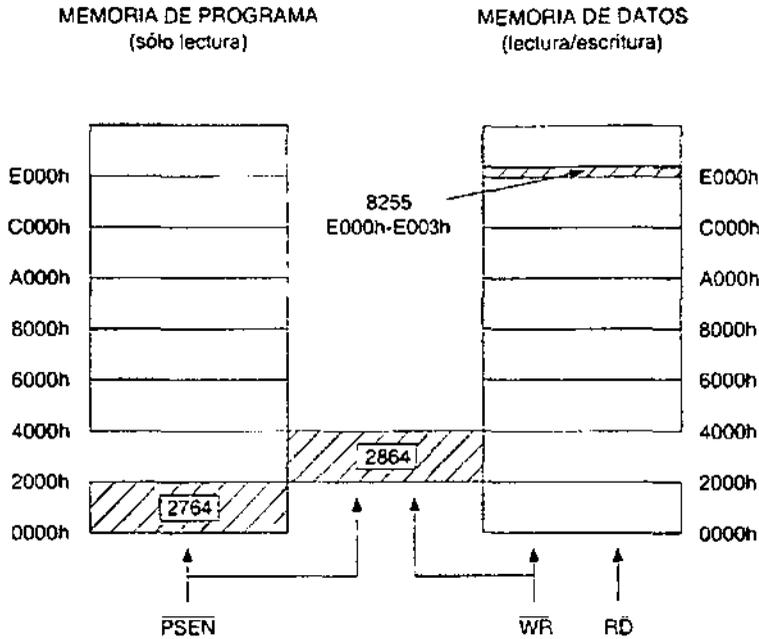


Figura 3.4 - Mapa de la memoria externa

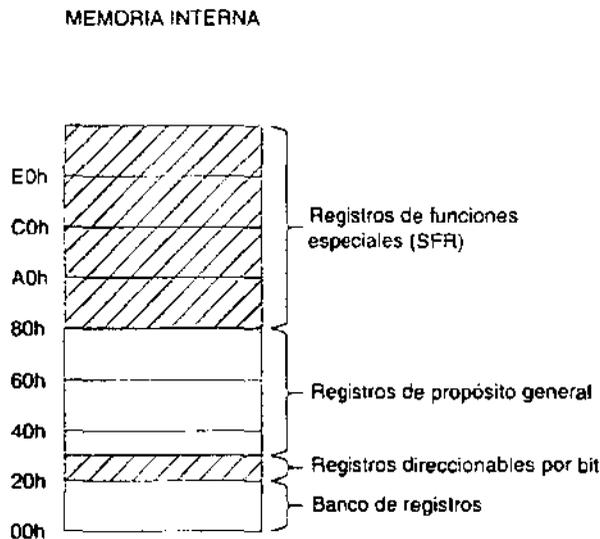


Figura 3.5 - Mapa de la memoria interna del microcontrolador

El último elemento esencial de la tarjeta de adquisición de datos es el decodificador de memoria. Se trata de un circuito multiplexor que tiene como entradas los bits de direcciones  $A_{13}$ ,  $A_{14}$  y  $A_{15}$ . Con estas tres señales se consigue dividir el mapa de memoria en bloques de longitud 2000h, que es precisamente la capacidad de cada uno de los chips de memoria, es decir, tanto el 2764 como el 2864 pueden almacenar hasta 8Kb de información. De esta manera, cada combinación de entradas al decodificador permitirá

que se active una sola de sus 8 salidas. Estas salidas (Y0 a Y7) se conectarán, cada una, a la terminal CS (chip Select) del circuito correspondiente para acceder a la información. Así, según la manera en la que está diseñada la tarjeta, el rango de direcciones 0000h a 1FFFh está asignado a la memoria ROM, mientras que la memoria RAM tiene asignadas las direcciones 2000h a 3FFFh y el puerto paralelo manejado por el chip 8255 será seleccionado cuando en el bus de direcciones se coloque cualquier valor entre E000h y FFFFh, aunque en realidad sólo se empleen las primeras 4 localidades, 3 para seleccionar cada uno de los tres puertos que maneja y una para enviar la palabra de control.

### 3.4 CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO Y PRUEBAS

En la sección anterior se mencionó todo lo que se refiere a la tarjeta de adquisición de datos, como un sistema de propósito general. Ahora toca mencionar las particularidades que es necesario considerar para que la tarjeta cumpla con el objetivo del presente trabajo.

Las variables del proceso, se medirán mediante sensores de diferentes tipos. Cada uno de estos sensores emitirá una señal que no necesariamente es apropiada para utilizarse con la interfaz de la computadora. Es por eso que dichas señales necesitan ser acondicionadas, de manera que puedan ser tomadas por la tarjeta de adquisición de datos y, posteriormente, enviadas a la PC.

En el capítulo correspondiente a la instrumentación se definió el tipo de sensores para medir cada una de las variables físicas. Así, para la presión, se eligió el sensor de presión MPX2200, que puede medir presiones diferenciales de hasta 200kPa con una salida máxima de 40mV.

Para la temperatura se emplearían los termopares cobre-constantán y cromel-alumel. Sin embargo, tal como se mencionó en aquel capítulo, los termopares necesitan ser compensados por temperatura, para lo cual se utilizaría un dispositivo que nos proporcione la temperatura a la cual se encuentra la unión fría del termopar. El circuito empleado para este fin es el LM35, que es un sensor de temperatura con un rango de 0 a 50°C, proporcionando una salida lineal de 10mV por cada grado centígrado.

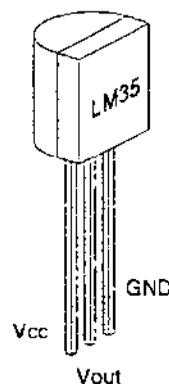


Figura 3.6 – Sensor de temperatura LM35

Como se puede notar, cada uno de los elementos de medida proporciona una salida en voltaje. Sin embargo, los valores de las salidas son muy pequeños y deben ser amplificados para que puedan ser leídos por el convertidor analógico-digital. Para ello se emplea el siguiente circuito.

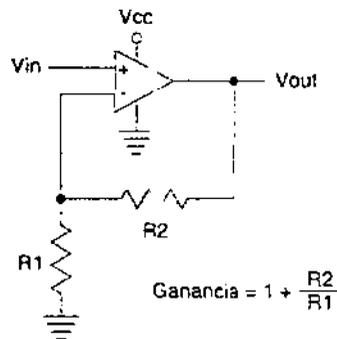


Figura 3.7 - Circuito amplificador de señales

Así, por ejemplo, para el LM35, cuyos valores de salida oscilan entre 0 y 500mV, los valores de los resistores deberán ser  $R_1=1k\Omega$  y  $R_2=9k\Omega$ , con lo que se logra una ganancia de 10 y, consecuentemente, una salida de 0 a 5V.

Una vez que se tiene un rango adecuado de voltaje (0 a 5V) para cada elemento de medición, es necesario transformar la señal analógica a un valor digital. Esto se logra mediante un convertidor analógico-digital. Particularmente, en este trabajo se empleó el ADC0809, que tiene una resolución de 8-bit, lo cual significa que cada bit representa  $1/256$  del rango de entrada, es decir 0.0195V. La manera en la que el convertidor analógico-digital se conecta a la tarjeta de adquisición de datos se muestra en el siguiente diagrama:

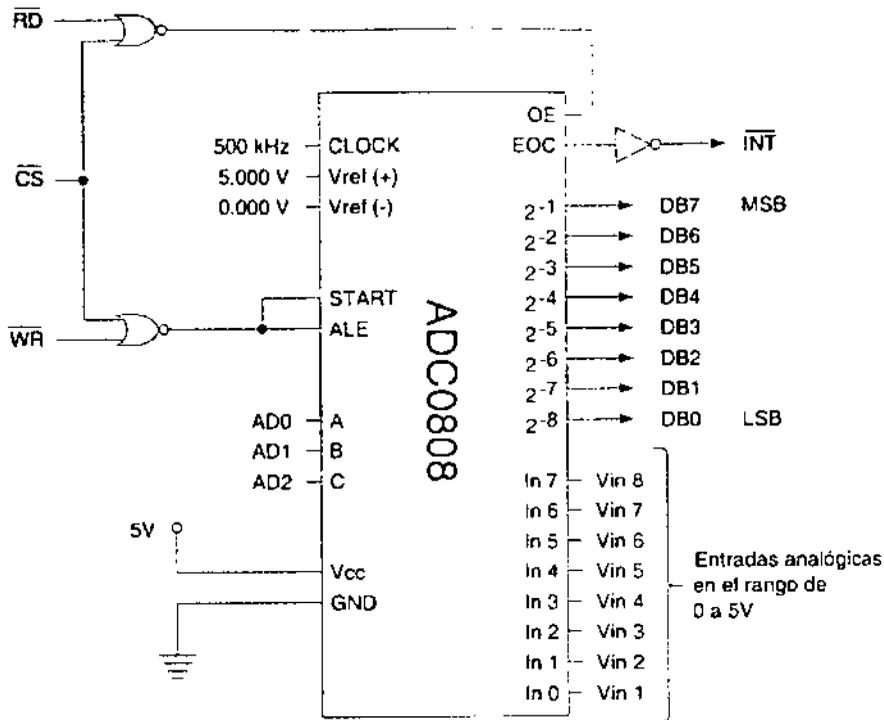


Figura 3.8 - Conexiones del convertidor analógico-digital

Cabe hacer notar la importancia de una señal de reloj para que el convertidor funcione correctamente. Para la obtención de esta señal se empleó un circuito timer, el LM555, que conectado de la siguiente manera proporciona una señal de reloj.

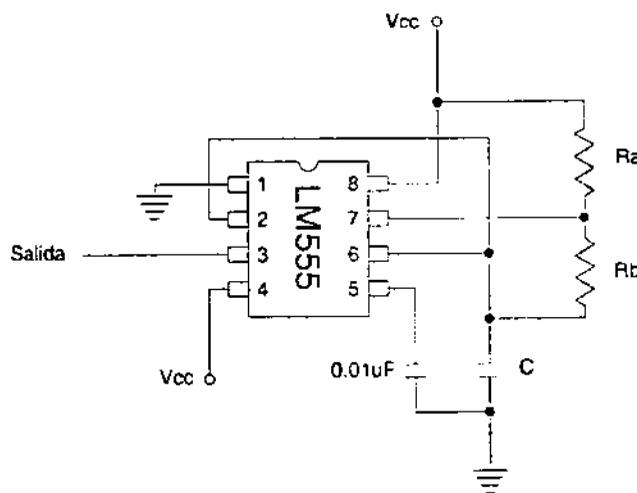


Figura 3.9 - Conexiones del generador de pulsos

Según la hoja de información técnica de este circuito, la frecuencia de oscilación de la señal que proporciona, se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$f = \frac{1.44}{(R_a + 2R_b)C}$$

pero en la práctica, esta fórmula es correcta para bajas frecuencias, mientras que para frecuencias como la requerida por el convertidor analógico-digital (500kHz), las capacitancias internas de los circuitos parecen jugar un papel importante. Fue necesario obtener los valores de las resistencias y de la capacitancia mediante prueba y error, con lo que se llegó a los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} R_a &= 10\text{k}\Omega \\ R_b &= 24\text{k}\Omega \text{ y} \\ C &= 0.01\mu\text{F} \end{aligned}$$

Con estos valores, la frecuencia de la señal del reloj tiene un valor de 480kHz, que es suficiente para que el convertidor analógico-digital funcione correctamente

Una vez que se tuvieron listos los circuitos que he mencionado, lo siguiente fue conectarlos con la tarjeta de adquisición de datos y esta, a su vez, con la computadora. Entonces, mediante un programa de prueba escrito para el microprocesador de la tarjeta de adquisición, que se puede consultar en los apéndices, se pudieron realizar pruebas en las que se enviaba por el puerto serial un número decimal, que indicaba el canal del convertidor analógico-digital del que se deseaba conocer el valor de la señal. El programa tomaba dicho número y enviaba las instrucciones necesarias para que el convertidor realizara la conversión y regresara el valor digital correspondiente. Entonces, dicho valor era puesto en base decimal y enviado de regreso a la computadora por el puerto serial.

Las pruebas realizadas dieron resultados positivos, indicando que el sistema diseñado está listo para ser instalado y utilizado.

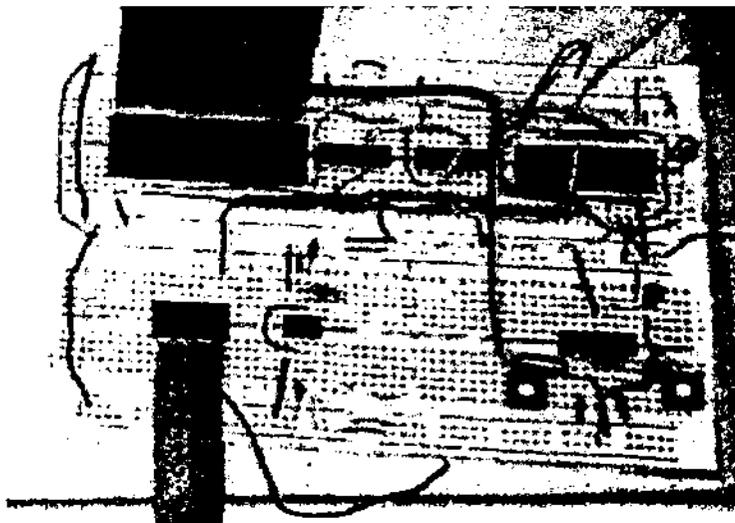


Figura 3.10 – Circuitos acondicionadores de señales

## Capítulo IV IMPLEMENTACIÓN

Con lo que se ha tratado en los capítulos anteriores, hasta ahora conocemos los diferentes ciclos que componen a un ciclo combinado, la manera en que operan y la base para el cálculo de la eficiencia de cada uno de ellos.

También se realizó un análisis para saber cuales son las variables físicas indispensables para poder calcular la eficiencia el ciclo combinado, así como los rangos de valores que usualmente presentan.

Por otro lado se explicó el funcionamiento de los sistemas de instrumentación y monitoreo, presentando los conceptos básicos y la ruta que sigue la información dentro de estos sistemas. Posterior a la presentación de la clasificación de los instrumentos de medición, se encuentra la selección de los instrumentos adecuados para este proyecto. De igual manera se ha presentado la constitución de las computadoras y más específicamente de los sistemas inmersos, dentro de los cuales se puede considerar incluida a la tarjeta de adquisición de datos.

Sin embargo, todo lo anterior no tendría mucho sentido si no se pusiera dentro de un marco práctico de funcionamiento. Esto quiere decir, ubicar la manera en la que la tarjeta de adquisición de datos, junto con todo el análisis termodinámico y mecatrónico que hay detrás de ella, funcionará.

Para el caso particular de este proyecto, la ubicación se encuentra en el Laboratorio de Máquinas Térmicas. Dentro de este laboratorio se encuentra un espacio destinado al ciclo combinado, aún por concluir, y el objetivo de esta tesis deja claro el hecho de contribuir de manera directa a mejorar la calidad de la enseñanza en dicha parte del laboratorio.

Es así que dentro del plan de instalación del equipamiento para el ciclo combinado, se debe contemplar el cableado y equipo adicional (termopares, sensores de presión, circuitos eléctricos, computadoras, etc.) para que lo que se ha presentado en este trabajo pueda ser implementado en el laboratorio.

Este trabajo se puede tomar como una guía para iniciar su proceso de instalación, pues muestra cada uno de los elementos con los que se puede armar el sistema de instrumentación, aunque sin hacer referencia a las especificaciones de cableado dentro del laboratorio. Sin embargo, cubre cada uno de los pasos desde la toma de las variables del proceso en el medio ambiente, hasta el paso de información de la tarjeta de adquisición a la computadora.

Una parte importante también, es lo que el usuario final percibirá de todo este sistema, esto es lo que se conoce en terminología de computación como el *front end*, o lo que el usuario ve y que al final de cuentas es lo que servirá para darle información.

El alcance de este trabajo de tesis ha sido modificado para poder incluir una aplicación sencilla pero funcional que permita explotar la información proveniente de la tarjeta de adquisición de datos.

## 4.1 BASES PARA EL DISEÑO DE LA INTERFAZ

Esta es una parte importante debido a que todo el funcionamiento del sistema de adquisición de datos tendrá como elemento final la interfaz con el usuario.

Como se mencionó anteriormente, todos los datos que se adquieran mediante el sistema que se pretende diseñar, serían mostrados en el monitor de una computadora. El aspecto que la pantalla tendría es lo que se conoce con el nombre de Interfaz Gráfica de Usuario (GUI por sus siglas en inglés), que consiste de una o más pantallas llenas de objetos, menús, botones, listas desplegables, cuadros de edición, todos inactivos hasta que el usuario provoca un evento en la forma de opresión de una tecla, un clic del ratón, un toque de dedo o un comando de voz<sup>21</sup>. Una vez que el evento ocurre, el usuario espera que cada objeto se comporte de manera confiable y predecible, lo cual hace que la programación orientada a objetos y manejada por eventos sea perfecta para el desarrollo de las aplicaciones que corren bajo Windows.

Con lo anterior, se adelanta que la intención del presente trabajo fue crear un programa de aplicación que corre bajo la plataforma Windows, que es la más popular en estos días. Particularmente, el lenguaje de programación que se utilizó fue Visual Basic en la versión 6.0. Las ventajas que este tipo de desarrollo presenta son las siguientes:

- Comodidad para el usuario, debido a que está acostumbrado a manejar pantallas dentro del ambiente Windows.
- Facilidad de manejo mediante objetos sencillos con funciones bien definidas.
- Una interfaz amigable, esto es, que resulta grata para el usuario, debido a que la información se presenta de manera gráfica, ayudada por dibujos que ayudan a la mejor comprensión de los datos que se presentan.
- Facilidad de programación, el lenguaje es muy sencillo de utilizar obteniendo resultados rápidos y efectivos si se realiza una arquitectura adecuada.
- Capacidad de comunicación con el puerto serial. Esto es esencial, debido a que la tarjeta de adquisición de datos, de la cual se hablará en el siguiente capítulo, tiene al puerto serial como medio de comunicación con la computadora.

Cabe mencionar, además de las ventajas que ofrecen los lenguajes visuales, las razones por las cuales se desarrolló una aplicación para el monitoreo de las señales.

A pesar de que pudieran existir en el mercado aplicaciones industriales que sirvieran para el objeto del presente trabajo, es natural que por muy especializados que sean o por muy potentes que parezcan, los programas de aplicación comercializados no pueden resolver todos los problemas. Por ejemplo, en el campo profesional, el control de un proceso industrial con la ayuda de una computadora se puede llevar a cabo con la condición de desarrollar un programa particular para esa tarea y asegurar la conexión adecuada con el equipo que se controla. "No se trata ya de utilizar lo que existe, sino de crear. Ningún programa de aplicación está suficientemente adaptado para el problema muy especial que se plantea"<sup>22</sup>.

<sup>21</sup> Steven H., Mark; "La esencia de Visual Basic 4"; Prentice Hall; México, 1996; p. 4

<sup>22</sup> C. Pariot; "Introducción a los microprocesadores y microordenadores"; Gustavo Gili; España, 1988; p. 135

Así pues, el software que se desarrolló para el monitoreo de las señales del ciclo combinado, tiene funciones particulares basadas en los siguientes conceptos:

1. *Recolección de datos* – Esto se lleva a cabo mediante un barrido periódico de todas las salidas de la instalación (que son las entradas a nuestro sistema), siendo leídas una tras otra.
2. *Procesamiento de datos* – Según la complejidad del sistema a vigilar, el número de valores recogidos y lo que se búsque obtener mediante la aplicación, el procedimiento será más o menos importante.

En efecto, lo que se pretende mediante el software que se desarrolló en este trabajo, es mostrar en la pantalla un esquema gráfico del ciclo combinado, de manera similar al esquema que se muestra en el capítulo primero. Dentro de este esquema se muestran los puntos de los cuales se están obteniendo valores de presión y temperatura indicando la magnitud de cada uno de ellos de manera constante. Esto quiere decir que el programa hace una petición a la tarjeta para que esta le proporcione de manera continua y una tras otra, las señales provenientes de los sensores previo acondicionamiento mediante los circuitos correspondientes. Con esto, las magnitudes mostradas en la pantalla están variando en el tiempo mostrando los valores reales de las variables que se miden.

Como una segunda característica, el sistema es capaz de utilizar la información recibida para calcular la eficiencia del proceso utilizando las fórmulas que se han mencionado en este trabajo. Para ello es necesario que el programa tenga acceso a las tablas de propiedades de agua y aire, ya que de ahí se obtienen algunos valores necesarios para el cálculo de la eficiencia. Al igual que las magnitudes de las señales que se recolectan, la eficiencia es actualizada en cada barrido de señales y se presenta en la pantalla para que el usuario la conozca en todo momento.

A continuación se mencionan las etapas por las que tiene que pasar, en general, cualquier desarrollo de software para que funcione adecuadamente:

1. *Estudio de las necesidades* – Aquí se define el problema que se aborda de manera clara. Debe quedar establecido, a detalle, lo que se espera que realice la aplicación una vez que esta esté instalada. También se deben proponer posibles soluciones y escoger de entre ellas la que resulte más conveniente.
2. *Análisis y diseño* – Aquí se detalla la solución adoptada y se abordan temas como la definición de los algoritmos de los programas, el flujo de la información, la elección de las pantallas, el principio de almacenamiento de la información, el tiempo tanto para el desarrollo como para la instalación e incluso la evaluación financiera.
3. *Desarrollo* – Se refiere tanto a la programación como a la realización de las pruebas para comprobar que el software funciona correctamente.
4. *Instalación* – Se trata de la etapa de colocación del proyecto. Desde la conexión de la computadora al proceso que se monitorea hasta la realización de pruebas del programa desarrollado. Es raro que un programa funcione inmediatamente de manera correcta al final de un desarrollo, por lo que se debe considerar un periodo de puesta a punto indispensable.
5. *Explotación* – Esta es la etapa más larga y corresponde al funcionamiento operacional de la aplicación.

6. *Mantenimiento* – Es necesaria para la conservación de la aplicación y cubre tanto el aspecto del mantenimiento preventivo (de preferencia programado) como el mantenimiento correctivo cuando la aplicación presenta alguna anomalía.

Con lo anterior se pretende tener una base que le sea de utilidad a la persona que se encargue de desarrollar la aplicación de interfaz con el usuario.

La manera en la que está desarrollado el presente trabajo permite que la implementación del mismo sea suficientemente sencilla.

En este trabajo se encuentran especificados los puntos dentro del ciclo combinado en los que se debe realizar las mediciones y colocar los sensores para cada una de las variables físicas involucradas. También se encuentran los diagramas de los circuitos acondicionadores de señales, y aunque el alcance de la tesis no incluye la instalación del sistema, si se realizaron pruebas para comprobar que los circuitos presentados tanto la tarjeta de adquisición de datos, como los circuitos acondicionadores de señales funcionen correctamente al integrarse por un lado, con los instrumentos de medición y por el otro, con la computadora.

Esto quiere decir que se comprobó mediante un sencillo programa en ensamblador, que basta con enviar a la tarjeta, desde la computadora y por el puerto serial, el número del canal del cual se desea obtener la información y en un instante la computadora recibe por el mismo puerto un valor representativo de la cantidad medida en dicho canal.

## 4.2 DESARROLLO DE LA INTERFAZ

La aplicación desarrollada para este trabajo de tesis, tiene como objetivo mostrar de manera gráfica los resultados del proceso de instrumentación.

Tal y como se indicó en el apartado anterior, la aplicación se limitará a mostrar un esquema del ciclo combinado indicando los puntos de medición y, por otro lado, presentar cada uno de los valores correspondientes a las variables medidas. También se encargará de evaluar la eficiencia del ciclo combinado mediante las fórmulas vistas en el capítulo primero.

La pantalla que verá el usuario es la que se presenta en la siguiente figura 4.1.

### 4.2.1 Base de datos

Antes de continuar con la explicación de cada uno de los módulos, es conveniente presentar el diseño de la base de datos que da soporte a todas las operaciones de cálculo de la aplicación.

Debido a que es necesario contar con la información de las tablas de gas y de vapor de agua, estas tienen que estar disponibles en el sistema. Además, debe existir información sobre los valores máximos y mínimos de medición para cada entrada, que correspondan con el rango de entrada del convertidor analógico-digital (0 a 5V) y la salida (0 a 255).

La base de datos utilizada es Access 2000, por ser fácil de manejar, porque las características que presenta son suficientes para el buen funcionamiento de la aplicación, por su relativo bajo costo en relación con otras bases de datos como SQL Server 2000 u

Oracle 8 y por que toma parte del popular paquete de trabajo Office 2000, de Microsoft Corporation, lo cual hace que su adquisición sea relativamente sencilla.

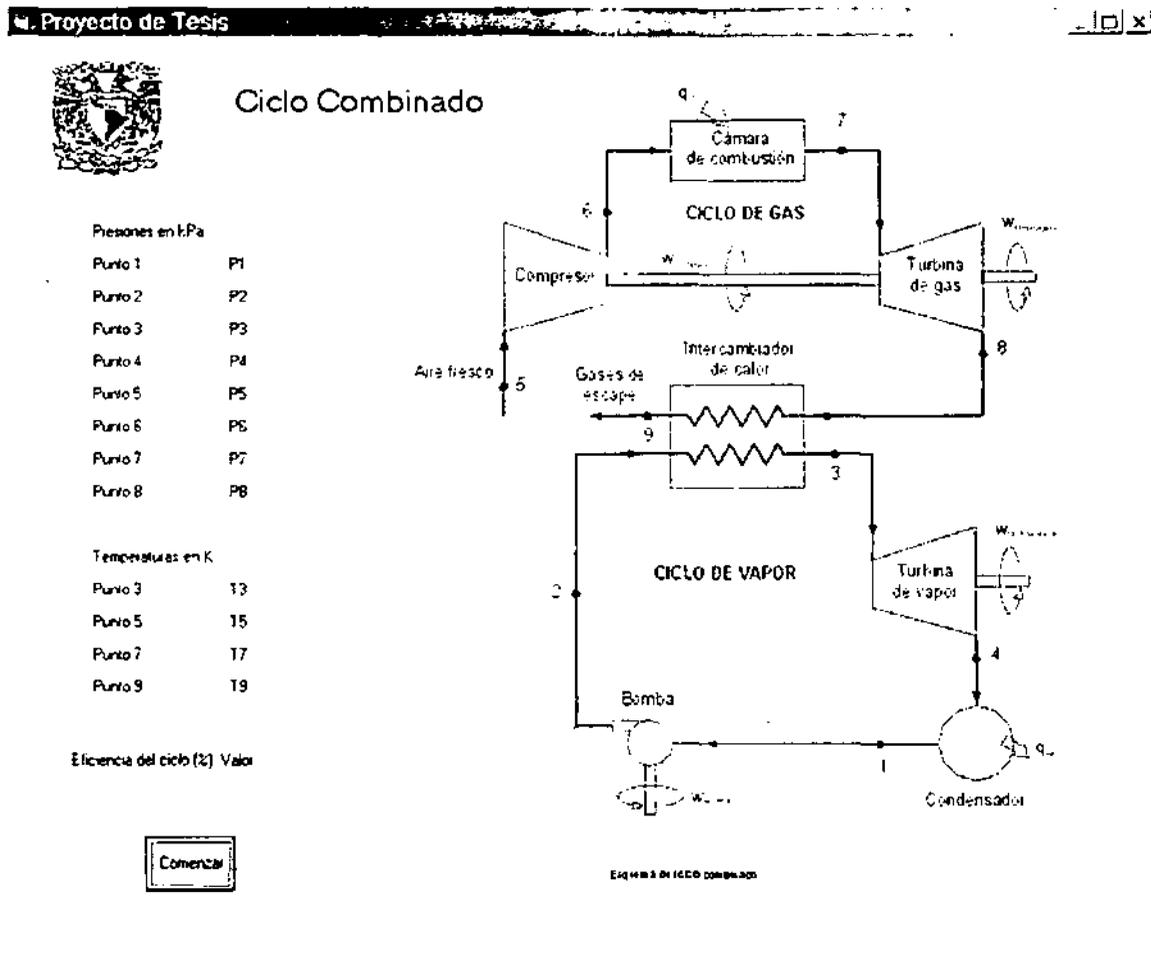


Figura 4.1 Front End de la aplicación

Las tablas que conforman la base de datos utilizada son las siguientes:

<b>InputsConfig</b>
MaxValue
MinValue
Type

Esta tabla permite configurar los valores máximos y mínimos para cada una de las entradas a la tarjeta, además de indicar el tipo de entrada.

Tanto las columnas MaxValue y MinValue son numéricas, mientras que la columna Type es de tipo texto.

Los tipos de entradas que se manejan son temperatura y presión. Para las entradas de temperatura, los valores máximo y mínimo deben estar en Kelvin, mientras que para presión deben estar en kPa.

<b>AirProperties</b>
Temperature
Enthalpy
RelativePressure

Esta tabla contiene las propiedades del aire que se utilizan en la aplicación y que corresponden a las que se presentan en los apéndices de este trabajo.

<b>SaturatedWaterProperties</b>
Pressure
FluidEnthalpy
GasEnthalpy
FluidSpecificVolume
FluidEntropy
GasEntropy

Aquí se reflejan las propiedades del agua saturada que se emplean en los cálculos de la aplicación. Los datos que contiene se obtuvieron de las tablas presentadas en los apéndices de este trabajo.

<b>SuperheatedWaterProperties</b>
Temperature
Pressure
Enthalpy
Entropy

Las propiedades del agua sobrecalentada necesarias para calcular la eficiencia del ciclo combinado, se presentan en esta tabla. Los datos que contiene se obtuvieron de las tablas que se presentan en los apéndices del presente trabajo.

<b>TemporalByPressure</b>
Temperature
Enthalpy
Entropy

Esta tabla sirve para almacenar valores de manera temporal, cuando se trata de recuperar el valor de alguna propiedad del agua sobrecalentada. El proceso que se lleva a cabo, así como la explicación del uso de esta tabla, se dará más adelante. Los valores contenidos en esta tabla son pues, dinámicos.

Las unidades de cada una de las propiedades representadas en la base de datos son las siguientes:

Propiedad	Unidad
Temperatura	Kelvin
Presión	kPa
Entalpía	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Entropía	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Volumen específico	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
Presión relativa	adimensional

Tabla 4.1 Unidades de las propiedades en la base de datos

#### 4.2.2 Funcionamiento de la aplicación

El funcionamiento de la aplicación está basado en varios módulos. El primero de ellos es un módulo de carga, que sirve principalmente para leer los valores máximos y mínimos de cada una de las entradas en un arreglo de variables, esto lo hace a partir de la tabla InputsConfig.

En este punto, la aplicación está esperando la acción del usuario para comenzar el monitoreo. Para ello, se cuenta con un botón que sirve para iniciar el proceso si está detenido y para suspenderlo si se encuentra en operación.

Una vez que el usuario inicia el proceso de monitoreo, la aplicación entra en un ciclo. Durante cada iteración, se incrementa un contador que es el que indica el número de entrada que será leída, una vez que han sido leídas todas las entradas se calcula la eficiencia del proceso y el contador de entradas toma su valor inicial.

La lectura de las entradas se realiza mediante un módulo separado, este módulo recibe como parámetro el número de la entrada que se desea leer, y devuelve el valor obtenido de la tarjeta. La programación utilizada tanto para la tarjeta como para la aplicación, permite independencia entre estos dos elementos, lo que se conoce como una arquitectura multicapa.

En este caso, se cuenta con dos capas, una es la aplicación de la cual he venido platicando a lo largo de este capítulo, y la otra es la que se encuentra en la memoria de la tarjeta de adquisición de datos. Esto permite que la aplicación pueda ser reemplazada por otra y continuar utilizando la misma tarjeta o bien, que se utilice la misma aplicación pero con una tarjeta distinta o un programa distinto dentro de la memoria de la misma tarjeta. Lo importante es que se mantenga una misma manera de comunicación, que en este caso se reduce al envío del número de puerto por parte de la aplicación y del valor leído en dicho puerto por parte de la tarjeta.

El código dentro de la tarjeta se encarga de interpretar el número de puerto enviado y de realizar las operaciones necesarias para hacer el direccionamiento correcto en memoria hacia el convertidor analógico-digital, así como tomar el valor recibido por este último y colocarlo en el buffer de salida al puerto serial. El código completo de este programa se encuentra en la sección de apéndices de este trabajo.

Una vez que la aplicación ha recibido el valor de la tarjeta, el valor decimal es acotado al rango aceptable de 0 a 255, que corresponde con la resolución máxima del convertidor analógico-digital de 8 bits que se emplea. Este número, que será llamado valor de entrada, sirve para calcular el valor real de la propiedad asociada con el puerto leído, con ayuda de los valores máximos y mínimos cargados al inicio de la aplicación.

La manera en que se hace es la siguiente:

$$Real = \left( \frac{Máximo - Mínimo}{255} \right) (Entrada) + Mínimo$$

en donde:

*Real* – Es el valor calculado de la propiedad asociada con el puerto de entrada.

*Máximo* – Es el valor máximo que se espera del instrumento de medición y que corresponde al valor 255 de salida en el convertidor analógico-digital.

*Mínimo* – Es el valor mínimo que se espera del instrumento de medición y que corresponde al valor 0 de salida del convertidor analógico-digital.

*Entrada* – Es el valor de entrada proveniente de la tarjeta de adquisición de datos.

Una vez que se tiene el valor calculado de la propiedad, este se actualiza en la pantalla de la computadora y se continúa con el ciclo de lectura.

Cuando ha terminado con todas las entradas, el módulo encargado de controlar el ciclo de lectura llama al módulo que calcula la eficiencia del proceso.

Aquí hago uso de los análisis de los ciclos de gas y de vapor descritos en el primer capítulo de este trabajo. Siguiendo los pasos de las tablas 1.1 y 1.2, se calculan diferentes propiedades tanto para el ciclo de gas como para el ciclo de vapor, lo que se busca obtener finalmente, son los valores de la entalpía en cada punto del ciclo combinado.

Para el cálculo de las propiedades, se emplean diferentes módulos dentro de la aplicación. Uno de ellos permite obtener el valor de cualquier propiedad a partir del valor conocido de otra; esto es útil para aquellos estados tanto del gas como del agua con un solo grado de libertad, en otras palabras, este módulo se utiliza para el cálculo de propiedades a partir de las tablas de aire y de vapor saturado. El módulo está programado para realizar interpolaciones en caso de ser necesarias.

Para calcular propiedades de la tabla de vapor sobrecalentado, es necesario conocer de antemano dos propiedades, ya que este estado del agua cuenta con dos grados de libertad. Por lo general se emplea temperatura y presión como las propiedades de entrada.

En este caso, es muy común tener que realizar dos interpolaciones, la primera se realiza entre 2 valores de presión y se obtienen valores tanto de temperatura como de la propiedad buscada para una determinada presión. Estos valores son los que se guardan temporalmente en la tabla TemporalByPressure, que se mostró anteriormente en este capítulo. Después se realiza una interpolación en esta tabla para una temperatura dada.

Una vez que se tienen todos los valores de entalpía, la eficiencia del ciclo combinado se calcula de la siguiente manera:

Se obtiene el trabajo neto en el ciclo de gas,

$$w_{gas} = (h_7 - h_8) - (h_6 - h_5)$$

El trabajo neto en el ciclo de vapor,

$$w_{vapor} = (h_3 - h_4) - v_1 (P_2 - P_1)$$

El calor de entrada,

$$q_{entrada} = h_7 - h_6$$

La relación de flujos,

$$y = \frac{h_8 - h_9}{h_3 - h_2}$$

Y la eficiencia del ciclo combinado,

$$\eta_t = \frac{w_{en.} + \gamma(w_{vapor})}{q_{en}}$$

El valor obtenido se actualiza en la pantalla y se continúa con el proceso.

El siguiente esquema resume el funcionamiento de la aplicación:

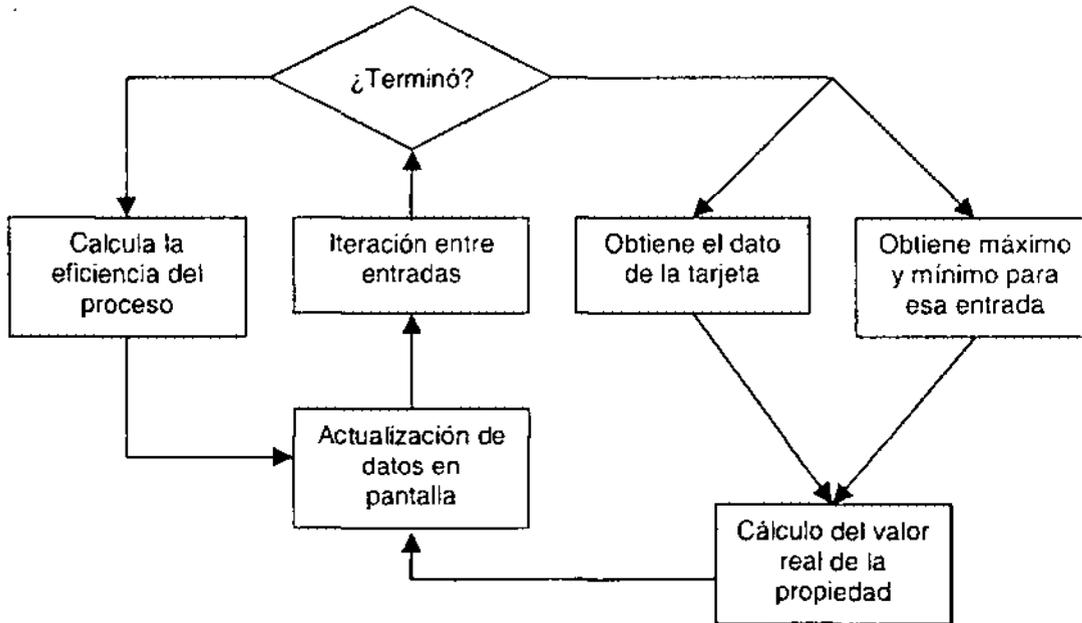


Figura 4.2 Esquema del funcionamiento de la aplicación

### 4.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

El esquema seguido para probar el funcionamiento integral de la aplicación y la tarjeta de adquisición de datos fue el siguiente:

- Para simular las entradas provenientes de los diferentes instrumentos de medición, se utilizaron potenciómetros sujetos a una diferencia de potencial de 5V.
- La salida de cada uno de estos potenciómetros se colocó en las entradas del convertidor analógico-digital.
- Se ajustó el voltaje de salida de los potenciómetros para que, de acuerdo con los valores máximos y mínimos de la base de datos, correspondiera a los valores esperados aproximados de cada propiedad según la tabla 1.3
- Se inició el sistema y se observaron los resultados.

La siguiente tabla resume las condiciones de operación de una de las pruebas realizadas:

Propiedad	Voltaje de salida del potenciómetro	Valor aproximado	Valor máximo	Valor mínimo	Valor en pantalla
<b>Presiones</b>	<b>V</b>	<b>kPa</b>			
P <sub>1</sub>	2.50	100	200	0	100.39
P <sub>2</sub>	0.15	3000	100000	0	3137.25
P <sub>3</sub>	0.15	3000	100000	0	3137.25
P <sub>4</sub>	2.50	100	200	0	100.39
P <sub>5</sub>	2.50	100	200	0	100.39
P <sub>6</sub>	1.50	300	1000	0	301.96
P <sub>7</sub>	1.50	300	1000	0	301.96
P <sub>8</sub>	2.50	100	200	0	100.39
<b>Temperaturas</b>	<b>V</b>	<b>K</b>			
T <sub>3</sub>	4.83	650	673	0	649.25
T <sub>5</sub>	2.23	300	673	0	300.87
T <sub>7</sub>	4.77	1500	1573	0	1498.98
T <sub>9</sub>	2.54	800	1573	0	801.92

**Tabla 4.2 Condiciones de operación de una de las pruebas realizadas**

Lo anterior arroja una eficiencia del ciclo combinado de **31.16%**. Esta eficiencia es muy aceptable para un proceso de este tipo. Las variaciones que podrían ocurrir en estos resultados, depende en gran medida de la salida de voltaje del potenciómetro y del rango que exista entre los valores máximos y mínimos para cada una de las propiedades, ya un rango alto de medición, disminuye la resolución que se obtiene en la conversión analógico-digital.

Es importante mencionar que la tabla anterior es un ejemplo de la experimentación que se hizo. La experimentación constó de diferentes tipos de pruebas divididas en dos partes principales: la parte general del comportamiento de la aplicación para los valores comunes aproximados de cada propiedad y la parte del comportamiento cuando varía cada una de las propiedades involucradas.

#### **4.3.1 Comportamiento general**

En esta primera parte, los experimentos trataban de ver el comportamiento general de la aplicación bajo las condiciones normales de operación. Se colocaban los potenciómetros en una posición inicial de 0V y luego se ajustaban hasta que el multímetro mostraba una salida igual a la indicada en la tabla 4.2 para cada propiedad. Se realizaba el monitoreo y se anotaba la eficiencia del proceso. Este experimento se repitió 10 veces con los siguientes resultados:

Repetición	Eficiencia (%)
1	31.80
2	30.52
3	31.82
4	33.08
5	32.49
6	32.93
7	33.50
8	31.74
9	31.16
10	32.21
<b>Promedio</b>	<b>32.13</b>

**Tabla 4.3 Resultados de las pruebas generales de comportamiento**

La eficiencia promedio que aquí se presenta es aceptable para un ciclo de este tipo, sobre todo si se considera que, tal como se mencionó en el capítulo primero, las grandes plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan este tipo de ciclos, alcanzan eficiencias de alrededor de 40%.

#### **4.3.2 Comportamiento por variación de la propiedad leída**

En la segunda parte de la experimentación, se aprovechó el desarrollo hecho en este trabajo, para ver la variación de la eficiencia del ciclo combinado dependiendo de la variación de cada una de las propiedades leídas.

La metodología seguida para esta parte consta de lo siguiente: Para cada prueba se colocaban todos los potenciómetros de manera que su salida correspondiera con la indicada en la tabla 4.2. Luego se hacía variar uno solo de los potenciómetros para simular una variación en la lectura de la propiedad correspondiente y observar la variación de la eficiencia del proceso.

El rango de variación utilizado fue de un 10% sobre el valor aproximado de cada propiedad indicado en la tabla 4.2. Es así que la variación se llevó desde el valor aproximado disminuido en 5% hasta el mismo valor aumentado en 5%.

Las tablas y las gráficas de cada serie de estos experimentos se muestran en las siguientes páginas.

Repetición	Valor general Variación del 10%		100kPa 10kPa
	Valor (kPa)	Voltaje (V)	Eficiencia (%)
1	95	2.38	31.14
2	96	2.40	31.14
3	97	2.43	31.15
4	98	2.45	31.15
5	99	2.48	31.15
6	100	2.50	31.16
7	101	2.53	31.16
8	102	2.55	31.16
9	103	2.58	31.16
10	104	2.60	31.17
11	105	2.63	31.17
	Promedio		31.16

Tabla 4.4 Variación de la eficiencia con la presión P1

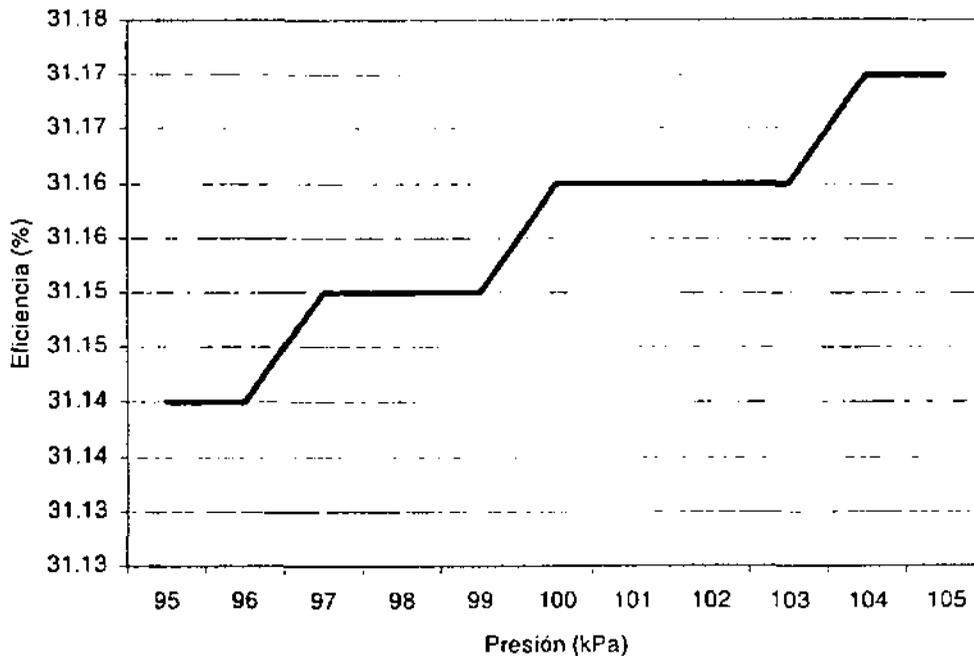


Figura 4.3 Gráfica la eficiencia contra la presión P1

Repetición	Valor general	3000kPa	Eficiencia (%)
	Variación del 10%	300kPa	
Valor (kPa)	Voltaje (V)		
1	2850	0.14	31.16
2	2880	0.14	31.16
3	2910	0.15	31.16
4	2940	0.15	31.16
5	2970	0.15	31.16
6	3000	0.15	31.16
7	3030	0.15	31.16
8	3060	0.15	31.16
9	3090	0.15	31.16
10	3120	0.16	31.16
11	3150	0.16	31.16
Promedio			31.16

Tabla 4.5 Variación de la eficiencia con la presión P2

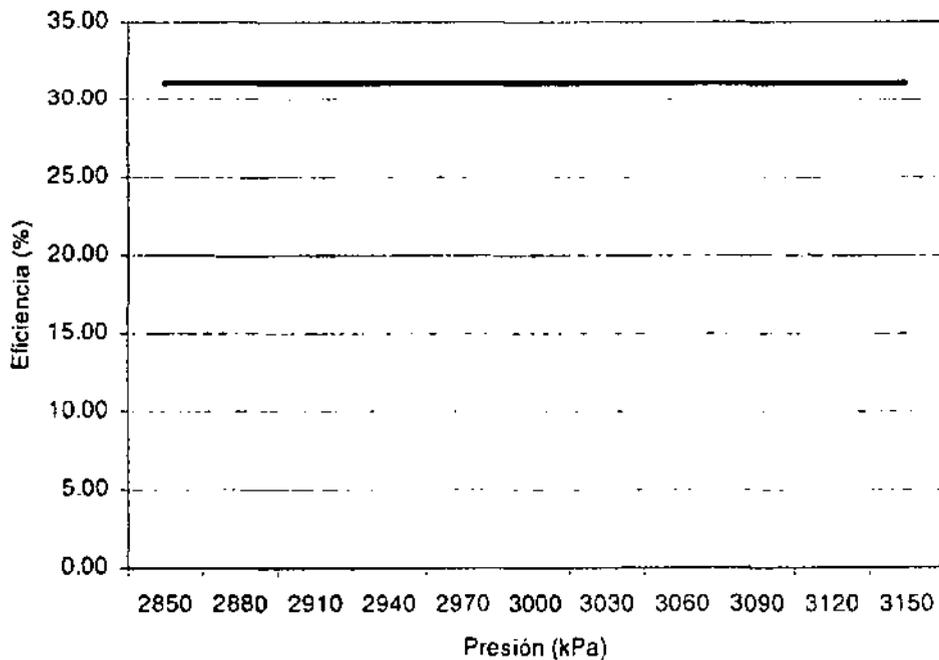


Figura 4.4 Gráfica la eficiencia contra la presión P2

Repetición	Valor general	3000kPa	Eficiencia (%)
	Variación del 10%	300kPa	
Valor (kPa)	Voltaje (V)		
1	2850	0.14	31.57
2	2880	0.14	31.57
3	2910	0.15	31.57
4	2940	0.15	31.57
5	2970	0.15	31.16
6	3000	0.15	31.16
7	3030	0.15	31.16
8	3060	0.15	31.16
9	3090	0.15	31.16
10	3120	0.16	31.16
11	3150	0.16	31.16
Promedio			31.31

Tabla 4.6 Variación de la eficiencia con la presión P3

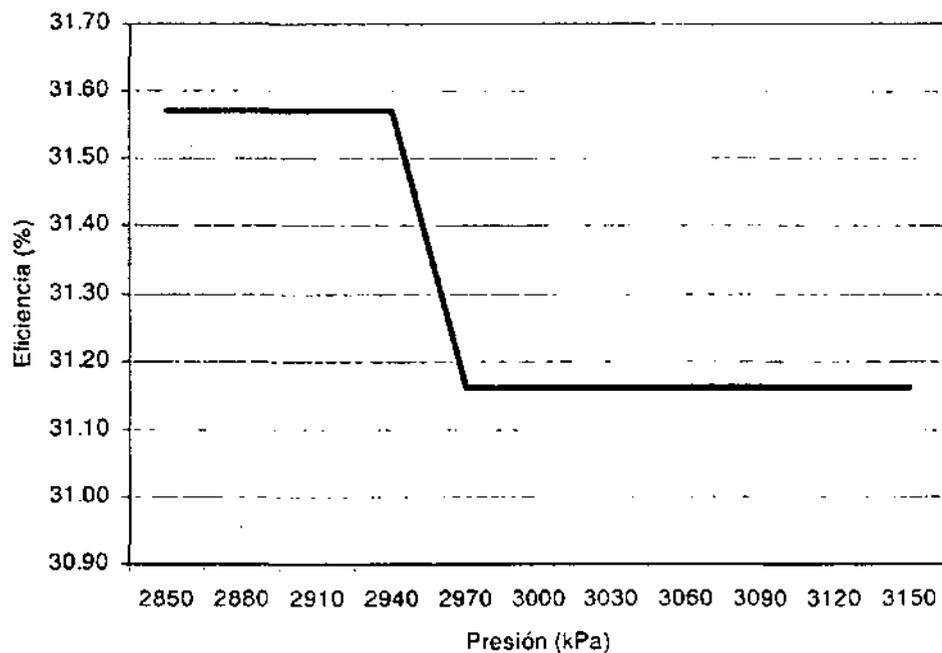


Figura 4.5 Gráfica la eficiencia contra la presión P3

Repetición	Valor general		100kPa 10kPa	
	Variación del 10%		Voltaje (V)	Eficiencia (%)
1	95		2.38	31.28
2	96		2.40	31.26
3	97		2.43	31.23
4	98		2.45	31.21
5	99		2.48	31.19
6	100		2.50	31.16
7	101		2.53	31.14
8	102		2.55	31.13
9	103		2.58	31.12
10	104		2.60	31.09
11	105		2.63	31.08
			Promedio	31.17

Tabla 4.7 Variación de la eficiencia con la presión P4

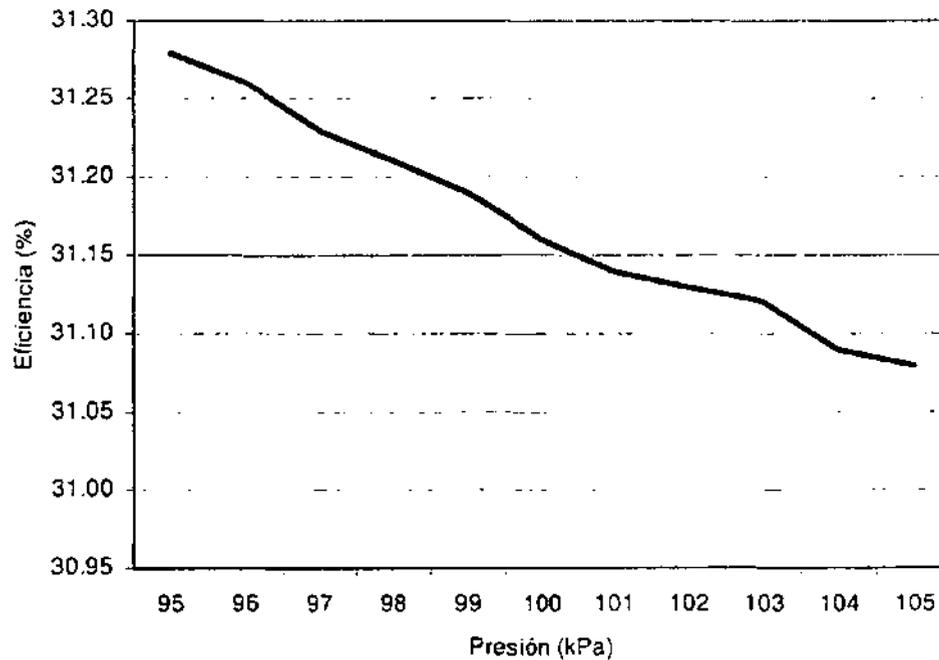


Figura 4.6 Gráfica la eficiencia contra la presión P4

Repetición	Valor aproximado Variación del 10%		100kPa 10kPa	
	Valor (kPa)	Voltaje (V)	Eficiencia (%)	
1	95	2.38	30.78	
2	96	2.40	30.84	
3	97	2.43	30.95	
4	98	2.45	31.00	
5	99	2.48	31.05	
6	100	2.50	31.16	
7	101	2.53	31.21	
8	102	2.55	31.26	
9	103	2.58	31.31	
10	104	2.60	31.41	
11	105	2.63	31.46	
		<b>Promedio</b>	31.13	

Tabla 4.8 Variación de la eficiencia con la presión P5

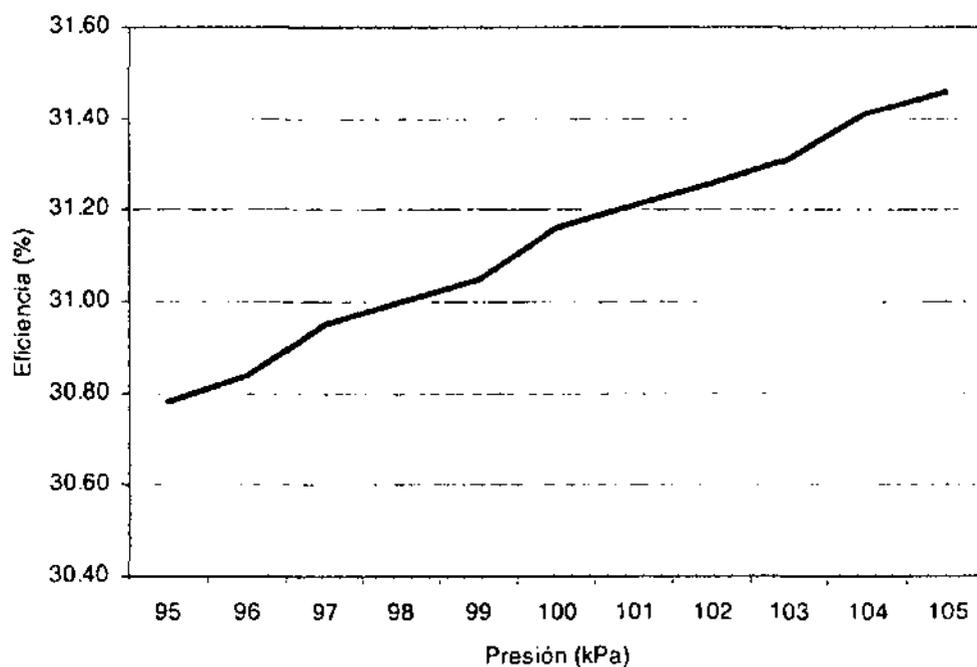


Figura 4.7 Gráfica la eficiencia contra la presión P5

Repetición	Valor general	300kPa	Eficiencia (%)
	Variación del 10%	30kPa	
Valor (kPa)	Voltaje (V)		
1	285	1.43	31.51
2	288	1.44	31.51
3	291	1.46	31.42
4	294	1.47	31.33
5	297	1.49	31.24
6	300	1.50	31.16
7	303	1.52	31.16
8	306	1.53	31.07
9	309	1.55	30.99
10	312	1.56	30.90
11	315	1.58	30.90
Promedio			31.20

Tabla 4.9 Variación de la eficiencia con la presión P6

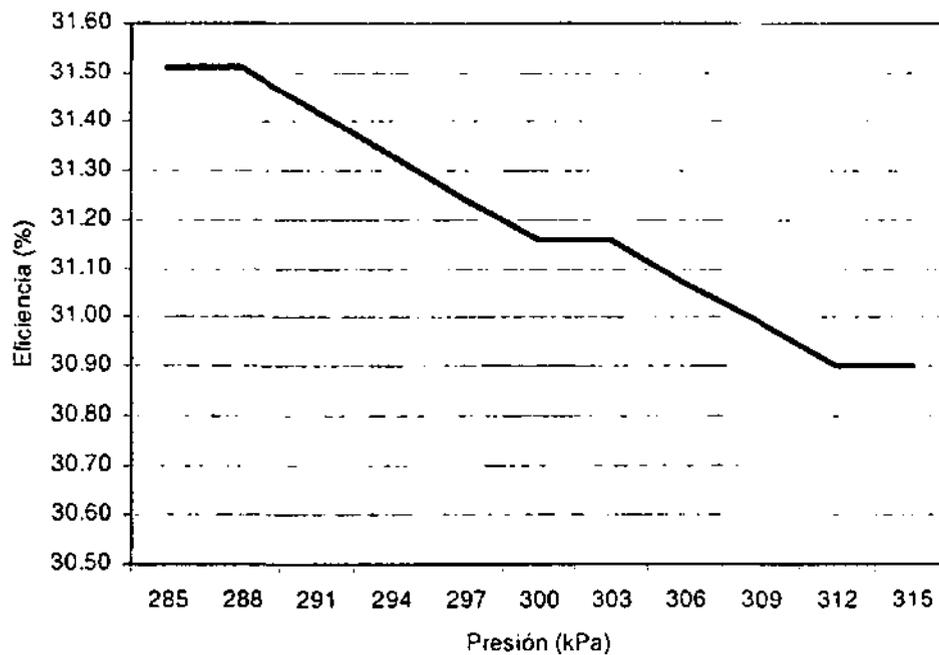


Figura 4.8 Gráfica la eficiencia contra la presión P6

Repetición	Valor general		Eficiencia (%)
	Valor (kPa)	Voltaje (V)	
1	285	1.43	29.98
2	288	1.44	29.98
3	291	1.46	30.28
4	294	1.47	30.58
5	297	1.49	30.87
6	300	1.50	31.16
7	303	1.52	31.16
8	306	1.53	31.44
9	309	1.55	31.71
10	312	1.56	31.98
11	315	1.58	31.98
Promedio			31.01

Tabla 4.10 Variación de la eficiencia con la presión P7

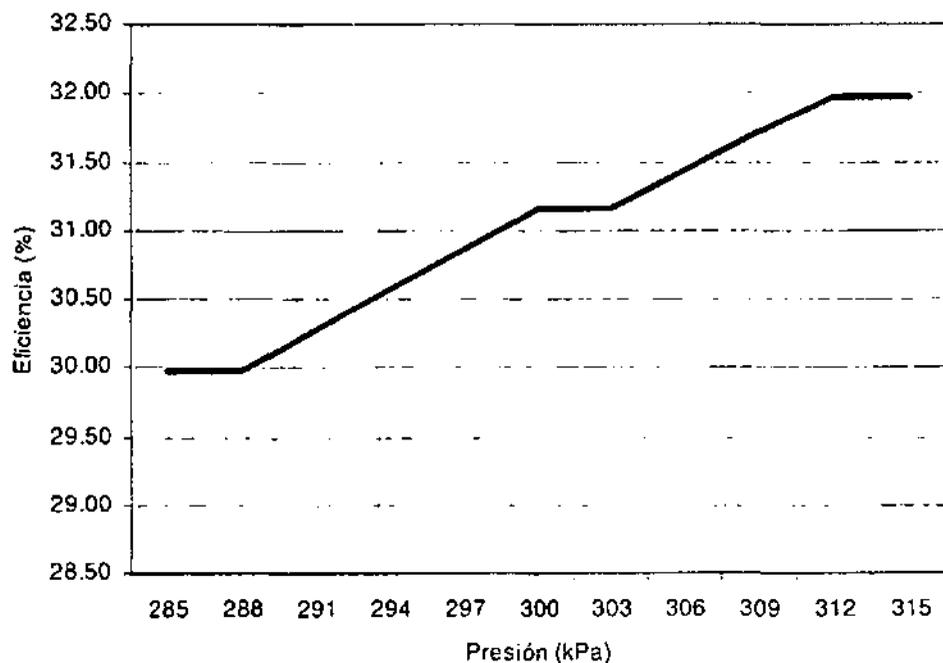


Figura 4.9 Gráfica la eficiencia contra la presión P7

Repetición	Valor general		Eficiencia (%)
	Valor (kPa)	Voltaje (V)	
1	95	2.38	32.38
2	96	2.40	32.20
3	97	2.43	31.84
4	98	2.45	31.67
5	99	2.48	31.50
6	100	2.50	31.16
7	101	2.53	30.99
8	102	2.55	30.82
9	103	2.58	30.65
10	104	2.60	30.31
11	105	2.63	30.15
Promedio			31.24

Tabla 4.11 Variación de la eficiencia con la presión P8

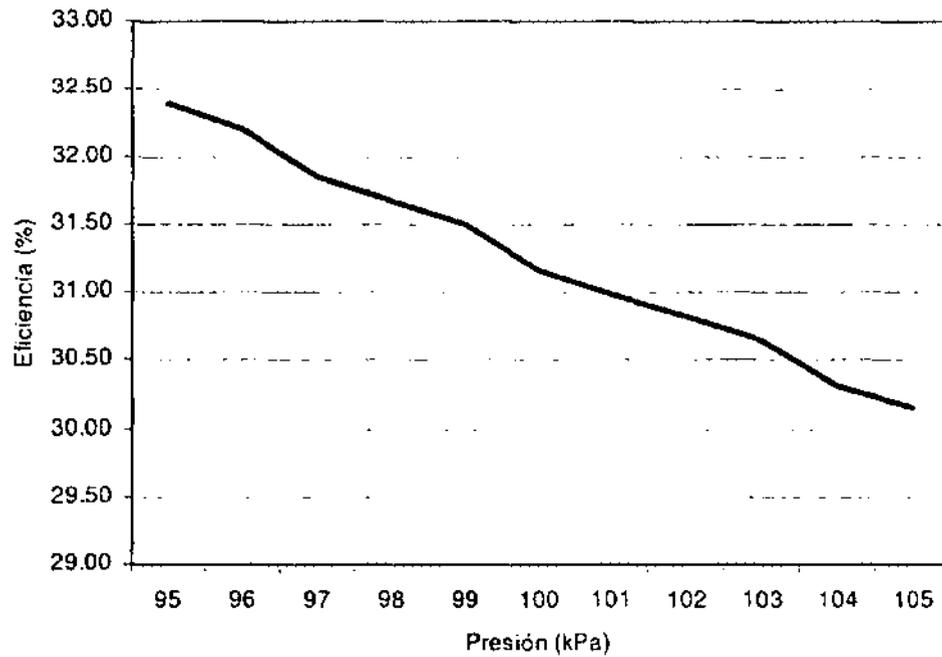


Figura 4.10 Gráfica la eficiencia contra la presión P8

Repetición	Valor general	650K	Eficiencia (%)
	Variación del 10%	65K	
	Valor (K)	Voltaje (V)	
1	617.5	4.59	31.07
2	624.0	4.64	31.08
3	630.5	4.68	31.10
4	637.0	4.73	31.12
5	643.5	4.78	31.14
6	650.0	4.83	31.16
7	656.5	4.88	31.18
8	663.0	4.93	31.20
9	669.5	4.97	31.22
10	676.0	5.02	31.23
11	682.5	5.07	31.23
		Promedio	31.16

Tabla 4.12 Variación de la eficiencia con la temperatura T3

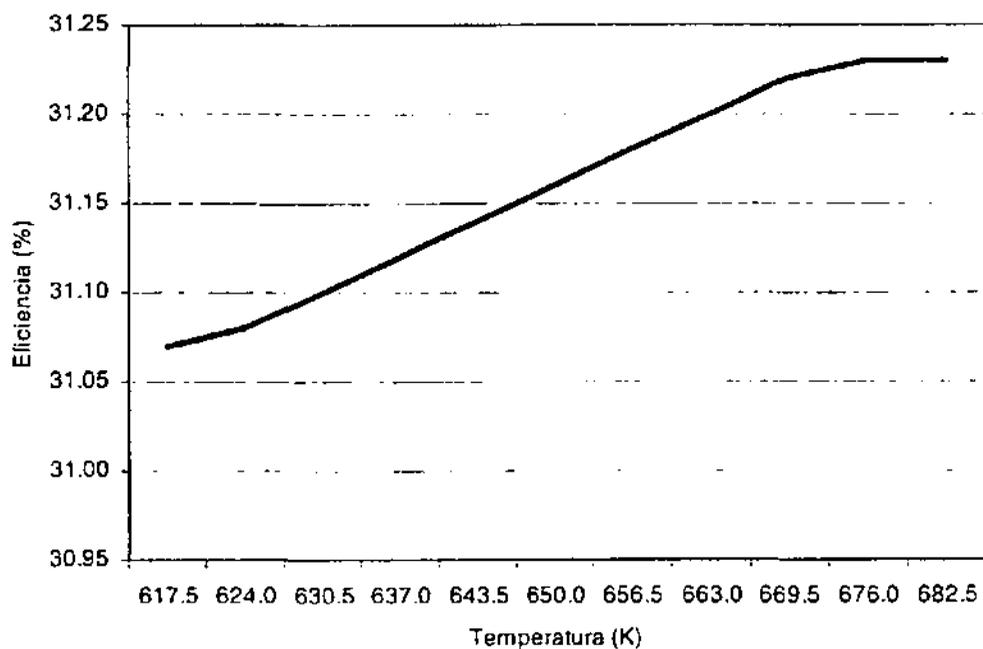


Figura 4.11 Gráfica la eficiencia contra la temperatura T3

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

Repetición	Valor general	300K	
	Variación del 10%	Voltaje (V)	30K
	Valor (K)		Eficiencia (%)
1	285	2.12	31.08
2	288	2.14	31.10
3	291	2.16	31.11
4	294	2.18	31.12
5	297	2.21	31.15
6	300	2.23	31.16
7	303	2.25	31.17
8	306	2.27	31.18
9	309	2.30	31.20
10	312	2.32	31.21
11	315	2.34	31.22
		Promedio	31.15

Tabla 4.13 Variación de la eficiencia con la temperatura T5

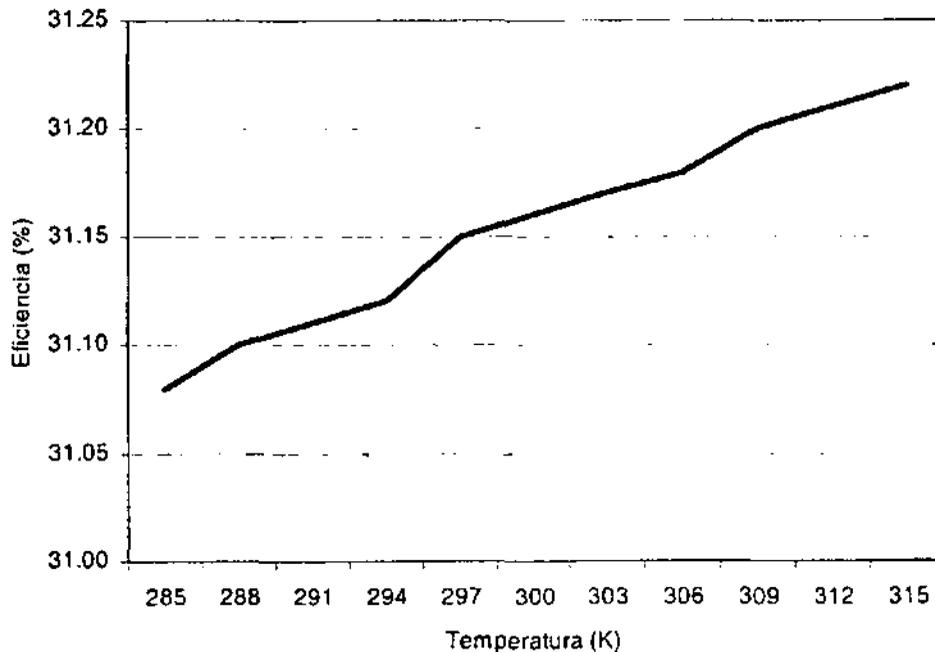


Figura 4.12 Gráfica la eficiencia contra la temperatura T5

Repetición	Valor general	1500K	Eficiencia (%)
	Variación del 10%	150K	
Valor (K)	Voltaje (V)		
1	1425	4.53	30.61
2	1440	4.58	30.70
3	1455	4.62	30.84
4	1470	4.67	30.93
5	1485	4.72	31.06
6	1500	4.77	31.16
7	1515	4.82	31.28
8	1530	4.86	31.36
9	1545	4.91	31.44
10	1560	4.96	31.55
11	1575	5.01	31.63
Promedio			31.14

Tabla 4.14 Variación de la eficiencia con la temperatura T7

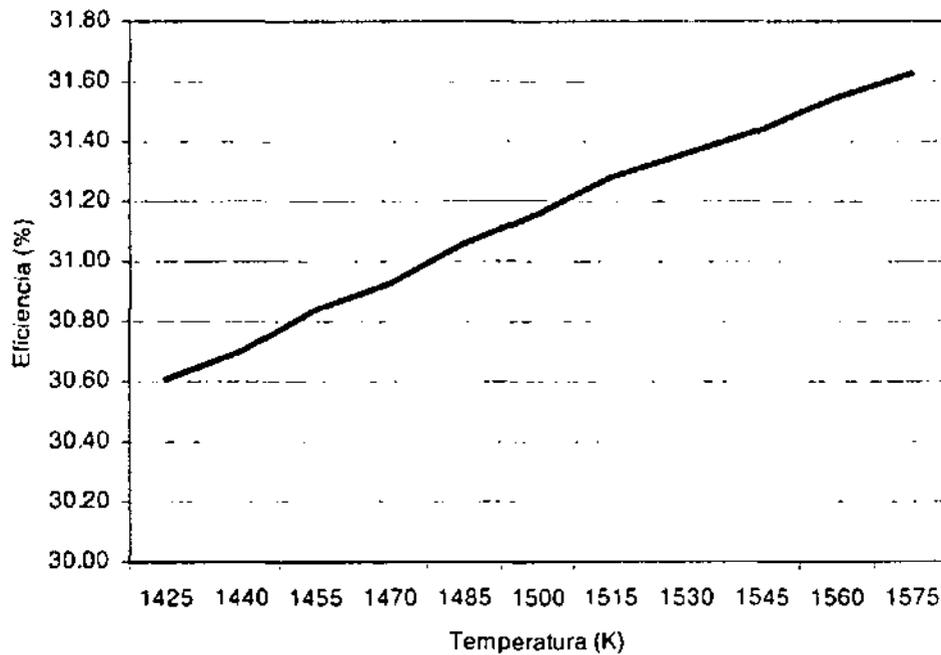


Figura 4.13 Gráfica la eficiencia contra la temperatura T7

Repetición	Valor general		Eficiencia (%)
	Valor (K)	Voltaje (V)	
1	760	2.42	31.90
2	768	2.44	31.69
3	776	2.47	31.58
4	784	2.49	31.48
5	792	2.52	31.37
6	800	2.54	31.16
7	808	2.57	31.05
8	816	2.59	30.94
9	824	2.62	30.73
10	832	2.64	30.62
11	840	2.67	30.51
Promedio			31.18

Tabla 4.15 Variación de la eficiencia con la temperatura T9

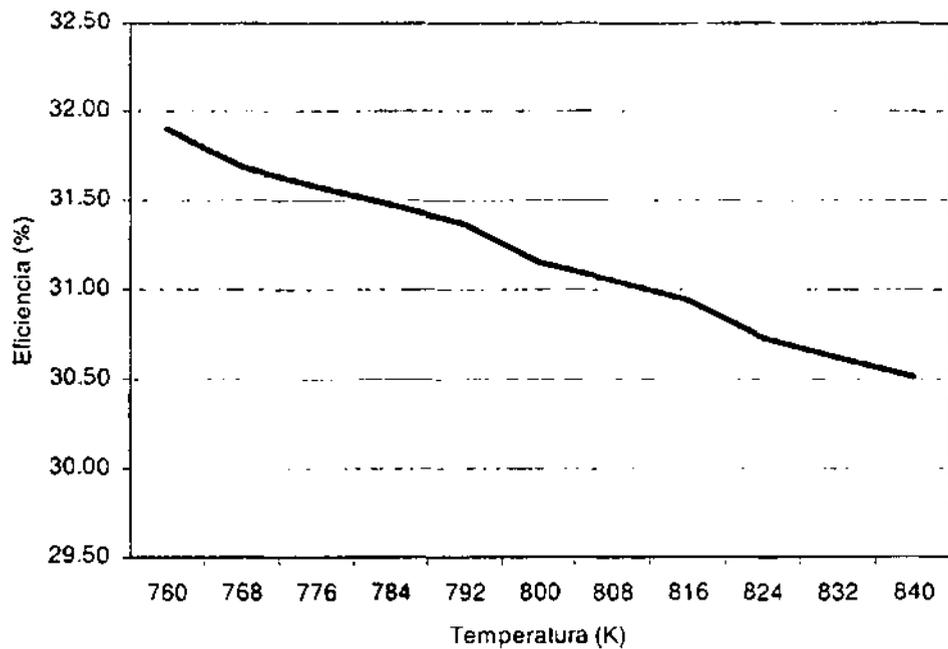


Figura 4.14 Gráfica la eficiencia contra la temperatura T9

### 4.3.3 Análisis de resultados

De los resultados anteriores se pueden hacer distintas observaciones:

- Los escalonamientos que se observan en algunas de las gráficas como en la correspondiente a la presión P1, se deben a las pequeñas variaciones del voltaje necesarias para variar el valor de la propiedad. Los casos extremos se notan en las gráficas correspondientes a P2 y P3, en donde la relación del valor medido de la presión, en relación con la mayor lectura que podría dar el instrumento, es muy pequeña.
- La variación de la eficiencia en relación con las presiones y temperaturas es, en realidad muy pequeña, pues en la mayoría de los casos no supera ni siquiera un punto porcentual. La mayor variación se observa con P8, pues supera ligeramente los 2 puntos porcentuales.
- Se observa también que para las temperaturas T3, T5 y T7, a mayor temperatura mayor eficiencia. Algo similar ocurre con las presiones P1, P5 y P7. Esto se explica porque los puntos 3 y 7 se encuentran antes de las turbinas en los ciclos de gas y vapor, por lo que cualquier aumento en presión o temperatura significa un mayor desarrollo de trabajo por parte de la turbina. Por otro lado, los puntos 1 y 5 se encuentran antes de la bomba y del compresor en los ciclos de vapor y gas respectivamente, lo cual significa que un aumento en la presión o temperatura significa una menor entrada de trabajo en la bomba o el compresor, cuando las demás propiedades mantienen su valor.
- La eficiencia se reduce a medida que aumenta la temperatura T9 o las presiones P3, P4, P6 y P8. El caso de la temperatura T9 se explica porque es la temperatura que corresponde a la salida de los gases de escape en el ciclo de gas, justo después del intercambiador de calor; el hecho de que aumente su valor quiere decir que existe una menor transferencia de calor en el intercambiador, lo que se traduce en un menor aprovechamiento del calor suministrado al sistema y por consecuencia, disminuye la eficiencia. Por su parte, el punto 6 está después del compresor, por lo que una mayor presión implica que el compresor requirió de más trabajo para comprimir el aire. Los puntos 4 y 8 se encuentran después de las turbinas de vapor y de gas respectivamente, y un aumento de la presión en estos puntos indica una disminución del trabajo que entregan las turbinas.
- La presión P2 no hizo variar la eficiencia de manera perceptible, tal como se indicó anteriormente, esto se debe probablemente a la relación entre el valor aproximado de operación de esta propiedad con el valor máximo del rango de medida del instrumento de medición.

La operación de la tarjeta durante estos experimentos se mantuvo estable, esto es, no hubo alteraciones que originaran resultados disparados o fuera de los rangos esperados.

Las conclusiones y recomendaciones generales sobre el presente trabajo, se exponen a continuación.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo, tal y como se pudo comprobar a lo largo del mismo, abarca 3 diferentes áreas dentro de un sistema de instrumentación, que si las ordenamos según el recorrido de la información, quedan de la siguiente manera:

- La primera parte fue la toma de variables del proceso. Esto implica el análisis que se debe realizar, según los requerimientos que se planteen, para diferenciar las variables que son de utilidad de las que no lo son y su ubicación física dentro del proceso. Una vez que están identificadas las variables útiles, lo siguiente es escoger el tipo de sensores adecuado para cada una de ellas según el tipo de variable y el rango de valores en el que opera.
- La segunda parte, es el conjunto de circuitos electrónicos que funcionan como intermediario entre el proceso y la computadora. Me refiero tanto a la tarjeta de adquisición de datos como a los circuitos acondicionadores de señales. Debido a que los sensores no necesariamente generan señales de salida apropiadas para ser manipuladas por la tarjeta de adquisición de datos, es necesario el uso de circuitos electrónicos para modificar la señal y dar como resultado una nueva señal que pueda ser enviada a través de la tarjeta hacia la computadora.
- Finalmente, el envío de las señales de los sensores a la computadora y el manejo de la información dentro de ella, forman la última parte. En realidad, la comunicación con la tarjeta resulta bastante sencilla, ya que de acuerdo con la manera en la que se propuso el diseño, la aplicación que funge como interfaz entre la computadora y el usuario, lo único que debe hacer es enviar por el puerto serial un número que indique el sensor del cual se desea conocer el valor de la señal que genera, y esperar que la tarjeta de adquisición de datos envíe dicho valor de regreso.

Las dificultades técnicas que se presentaron a lo largo del desarrollo de este trabajo, fueron únicamente en el nivel de circuitos eléctricos. En ocasiones los componentes electrónicos que se utilizan para fabricar la tarjeta no funcionan correctamente, un ejemplo de ello es el circuito 7805, una de cuyas terminales estaba rota y no hacía buen contacto con la pista de la tarjeta, lo que ocasionaba una pérdida de voltaje de 5 a 2V. Por ello es necesario revisar muy bien el correcto funcionamiento de la tarjeta, así como revisar que las pistas y los puntos de soldadura se encuentren en buenas condiciones.

Otra dificultad se presentó con el circuito que genera la señal de reloj para el convertidor analógico-digital, ya que cuando se emplean frecuencias como 500kHz y mayores, las capacitancias y resistencias internas del circuito son significantes y la fórmula para determinar el valor de los resistores y capacitores a emplear, no proporciona resultados verdaderos.

De acuerdo con las pruebas realizadas en la parte de implementación, se concluye que la aplicación desarrollada es suficiente para cumplir, en conjunto con la tarjeta, el objetivo del presente trabajo: medir las principales variables de un ciclo combinado, para presentarlas después de manera dinámica en una computadora.

Algunas recomendaciones para mejorar el funcionamiento actual del sistema son, por ejemplo, limitar los valores máximos y mínimos para cada propiedad a aquellos valores

que se espera recibir y no a los correspondientes al rango del instrumento de medición. Esto permitirá aumentar la resolución en el cálculo de la eficiencia del ciclo combinado. Se debe cuidar, sin embargo, que estos cambios se hagan tanto en la base de datos como en los circuitos de acondicionamiento, para asegurar que la salida máxima del convertidor analógico-digital corresponda con la que se determina en la base de datos.

Los algoritmos utilizados en la aplicación, para el cálculo de la eficiencia, pueden complementarse con algunos ajustes que permitan calcular desviaciones de los ciclos reales, de acuerdo con información sobre las eficiencias térmicas de las turbinas, por ejemplo.

Se puede admitir que, con los resultados de las pruebas descritas en el último capítulo, la tarjeta de adquisición de datos, junto con los circuitos acondicionadores y los sensores, están listos para ser instalados y utilizados en el proceso del ciclo combinado, y para trabajar de manera conjunta con la aplicación que se programó para mostrar los datos en la pantalla.

Cabe ahora mencionar que la principal aportación de este trabajo de tesis es dar a conocer el potencial de la tarjeta de desarrollo con un ejemplo práctico de aplicación. Por supuesto, es posible extender el alcance de este proyecto aún más. De hecho, un primer paso podría ser el monitoreo de un número mayor de variables que permitan realizar otras evaluaciones como, por ejemplo, la eficiencia de la caldera, en donde se involucran el gasto de combustible y el gasto de vapor.

Otra opción para continuar este proyecto, sería llevarlo al punto de convertirlo en un sistema de control, es decir, que además de recibir información del estado del proceso, pudiera modificar dicho estado mediante actuadores. Primero la computadora evaluaría cuales actuadores debería activar y por cuanto tiempo para llegar al estado deseado del proceso, luego se lo haría saber a la tarjeta de adquisición de datos, para que esta enviara la señal al elemento indicado.

Lo interesante de llevar a cabo proyectos tan completos, reside en la actividad multidisciplinaria que se requiere. Está claro que la conexión del microprocesador al proceso a controlar, la utilización de sensores adecuados y la concepción del software necesario para el buen funcionamiento del conjunto, sin ser evidentemente insuperables, requieren conocimientos de diversos campos de la ingeniería, principalmente de termodinámica, electrónica y computación. Es por ello que el manejo de los medios necesarios para la concretización de un proyecto completo y a menudo complejo, depende de personas calificadas en cada una de las áreas involucradas.

El empleo dado a la tarjeta de adquisición de datos en el presente trabajo, para monitorear un ciclo termodinámico, es sólo una muestra de la utilidad que se puede dar a desarrollos como el de la tarjeta dentro del área mecatrónica.

La flexibilidad para instalar y adecuar este sistema permite su uso en procesos distintos a los relacionados con la producción de energía; se podría emplear, por ejemplo, en la industria química, en donde se requiere un control muy preciso en la cantidad de cada una de las sustancias que se mezclan para fabricar algún producto que podría ser un detergente, algún alimento o medicinas.

Quiero terminar puntualizando la importancia que tiene el llevar a cabo investigaciones y proyectos como los que actualmente se tienen en el Departamento de Mecatrónica de

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

nuestra Facultad de Ingeniería. Estoy convencido de que con el apoyo y difusión suficientes, estos proyectos podrían ser empleados en la industria de nuestro país y ello, junto con la generación nacional de tecnología, contribuirían al desarrollo de México.

Temperatura K	Entalpia kJ/kg	Presion relativa	Energia interna kJ/kg	Volumen especifico relativo	Entropia en el estado estandar kJ/(kg*K)
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783
340	340.42	2.1490	242.82	454.1	1.82790
350	350.49	2.379	250.02	522.2	1.85708
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997
530	533.98	10.370	381.84	146.7	2.27967
540	544.35	11.100	389.34	139.7	2.29906
550	554.74	11.86	396.86	133.1	2.31809
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531
580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140

Temperatura K	Entalpia kJ/kg	Presión relativa	Energia interna kJ/kg	Volumen especifico relativo	Entropía en el estado estándar kJ/(kg·K)
600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
620	628.07	18.36	450.09	96.9	2.44356
630	638.63	19.84	457.78	92.8	2.46048
640	649.22	20.64	465.50	89.0	2.47716
650	659.84	21.86	473.25	85.3	2.49364
660	670.47	23.13	481.01	81.9	2.50985
670	681.14	24.46	488.81	78.6	2.52589
680	691.82	25.85	496.62	75.5	2.54175
690	702.52	27.29	504.45	72.6	2.55731
700	713.27	28.80	512.33	69.8	2.57277
710	724.04	30.38	520.23	67.1	2.58810
720	734.82	32.02	528.14	64.5	2.60319
730	745.62	33.72	536.07	62.1	2.61803
740	756.44	35.50	544.02	59.8	2.63280
750	767.29	37.35	551.99	57.6	2.64737
760	778.18	39.27	560.01	55.5	2.66176
780	800.03	43.35	576.12	51.6	2.69013
800	821.95	47.75	592.30	48.1	2.71787
820	843.98	52.59	608.59	44.8	2.74504
840	866.08	57.60	624.95	41.9	2.77170
860	888.27	63.09	641.40	39.1	2.79783
880	910.56	68.98	657.95	36.6	2.82344
900	932.93	75.29	674.58	34.3	2.84856
920	955.38	82.05	691.28	32.2	2.87324
940	977.92	89.28	708.08	30.2	2.89748
960	1000.55	97.00	725.02	28.4	2.92128
980	1023.25	105.20	741.98	26.7	2.94468
1000	1046.04	114.00	758.94	25.2	2.96770
1020	1068.89	123.40	776.10	23.7	2.99034
1040	1091.85	133.3	793.36	22.4	3.01260
1060	1114.86	143.9	810.62	21.1	3.03449
1080	1137.89	155.2	827.88	20.0	3.05608
1100	1161.07	167.1	845.33	18.9	3.07732
1120	1184.28	179.7	862.79	17.9	3.09825
1140	1207.57	193.1	880.35	16.9	3.11883
1160	1230.92	207.2	897.91	16.1	3.13916
1180	1254.34	222.2	915.57	15.2	3.15916
1200	1277.79	238.0	933.33	14.5	3.17888
1220	1301.31	254.7	951.09	13.7	3.19834
1240	1324.93	272.3	968.95	13.1	3.21751
1260	1348.55	290.8	986.90	12.4	3.23638
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.8	3.25510
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.3	3.27345
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.7	3.29160

Temperatura K	Entalpia kJ/kg	Presión relativa	Energia interna kJ/kg	Volumen especifico relativo	Entropía en el estado estándar kJ/(kg·K)
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.2	3.30959
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.8	3.32724
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.3	3.34474
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.9	3.36200
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.5	3.37901
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.2	3.39586
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.8	3.41247
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.5	3.42892
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.2	3.44516
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.9	3.46120
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.6	3.47712
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.3	3.49276
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.0	3.50829
1600	1757.57	791.2	1298.30	5.8	3.52364
1620	1782.00	834.1	1316.96	5.6	3.53879
1640	1806.46	878.9	1335.72	5.4	3.55381
1660	1830.96	925.6	1354.48	5.1	3.56867
1680	1855.50	974.2	1373.24	4.9	3.58335
1700	1880.10	1025.0	1392.70	4.8	3.59790
1750	1941.60	1161.0	1439.80	4.3	3.63360
1800	2003.30	1310	1487.20	3.9	3.66840
1850	2065.30	1475	1534.90	3.6	3.70230
1900	2127.40	1655	1582.60	3.3	3.73540
1950	2189.70	1852	1630.60	3.0	3.76770
2000	2252.10	2068	1678.70	2.8	3.79940
2050	2314.60	2303	1726.80	2.6	3.83030
2100	2377.40	2559	1775.30	2.4	3.86050
2150	2440.30	2837	1823.80	2.2	3.89010
2200	2503.20	3138	1872.40	2.0	3.91910
2250	2566.40	3464	1921.30	1.864	3.94740

Presión	Temperatura de saturación	Volumen específico		Energía interna		Entalpía		Entropía			
		P	Tsat	vf	vg	uf	ug	hf	hg	sf	sg
		kPa	°C	m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/(kg·K)	
0.6113	0.01	0.001	206.14	0	2375.3	0.01	2501.4	0	9.1562		
1.0	6.98	0.001	129.21	29.30	2385.0	29.30	2514.2	0.1059	8.9756		
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2393.3	54.71	2525.3	0.1957	8.8279		
2.0	17.5	0.001001	67	73.48	2399.5	73.48	2533.5	0.2607	8.7237		
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2404.4	88.49	2540.0	0.3120	8.6432		
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2408.5	101.05	2545.5	0.3545	8.5776		
4.0	28.96	0.001004	34.8	121.45	2415.2	121.46	2554.4	0.4226	8.4746		
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2420.5	137.82	2561.5	0.4764	8.3951		
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2430.5	168.79	2574.8	0.5764	8.2515		
10	45.81	0.00101	14.67	191.82	2437.9	191.83	2584.7	0.6493	8.1502		
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2448.7	225.94	2599.1	0.7549	8.0085		
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2456.7	251.40	2609.7	0.8320	7.9085		
25	64.97	0.00102	6.204	271.90	2463.1	271.93	2618.2	0.4931	7.8314		
30	69.1	0.001022	5.229	289.20	2468.4	289.23	2625.3	0.9439	7.7686		
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2477.0	317.58	2636.8	1.0259	7.6700		
50	81.33	0.00103	3.24	340.44	2483.9	340.49	2645.9	1.0910	7.5939		
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2496.7	384.39	2663.0	1.2130	7.4564		
MPa											
0.1	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2506.1	417.46	2675.5	1.3026	7.3594		
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2513.5	444.32	2685.4	1.3740	7.2844		
0.15	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2519.7	467.11	2693.6	1.4336	7.2233		
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2524.9	486.99	2700.6	1.4849	7.1717		
0.2	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2706.7	1.5301	7.1271		
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2533.6	520.72	2712.1	1.5706	7.0878		
0.25	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2716.9	1.6072	7.0527		
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	2540.5	548.89	2721.3	1.6408	7.0209		
0.3	133.55	0.001073	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2725.3	1.6718	6.9919		
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	2546.4	573.25	2729.0	1.7006	6.9652		
0.35	138.88	0.001079	0.5243	583.95	2548.9	584.33	2732.4	1.7275	6.9405		
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	2551.3	594.81	2735.6	1.7528	6.9175		
0.4	143.63	0.001084	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2738.6	1.7766	6.8959		
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	2557.6	623.25	2743.9	1.8207	6.8565		
0.5	151.86	0.001093	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2748.7	1.7608	6.8213		
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	2564.5	665.93	2753.0	1.8973	6.7893		
0.6	158.85	0.001101	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2756.8	1.9312	6.7600		
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	2570.1	684.28	2760.3	1.9627	6.7331		
0.7	164.97	0.001108	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2763.5	1.9922	6.7080		
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	2574.7	709.47	2766.4	2.0200	6.6847		
0.8	170.43	0.001115	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2769.1	2.0462	6.6628		
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	2578.7	732.22	2771.6	2.0710	6.6421		
0.9	175.38	0.001121	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2773.9	2.0946	6.6226		
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	2582.1	753.02	2776.1	2.1172	6.6041		
1	179.91	0.001127	0.19444	761.68	2583.6	762.81	2778.1	2.1387	6.5865		

Presión	Temperatura de saturación	Volumen específico		Energía interna		Entalpía		Entropía	
		P	Tsat	vf	vg	uf	ug	hf	hg
1.1	184.09	0.001133	0.17753	780.09	2586.4	781.34	2781.7	2.1792	6.5536
1.2	187.99	0.001139	0.16333	797.29	2588.8	798.65	2784.8	2.2166	6.5233
1.3	191.64	0.001144	0.15125	813.44	2591.0	814.93	2787.6	2.2515	6.4953
1.4	195.07	0.001149	0.14084	828.70	2592.8	830.30	2790.0	2.2842	6.4693
1.5	198.32	0.001154	0.13177	843.16	2594.5	844.89	2792.2	2.3150	6.4448
1.75	205.76	0.001166	0.11349	876.46	2597.8	878.50	2796.4	2.3851	6.3896
2	212.42	0.001177	0.09963	906.44	2600.3	908.79	2799.5	2.4474	6.3409
2.25	218.45	0.001187	0.08875	933.83	2602.0	936.49	2801.7	2.5035	6.2972
2.5	223.99	0.001197	0.07998	859.11	2603.1	862.11	2803.1	2.5547	6.2575
3	233.90	0.001217	0.06668	1004.78	2604.1	1008.42	2804.2	2.6457	6.1869
3.5	242.60	0.001235	0.05707	1045.43	2603.7	1049.75	2803.4	2.7253	6.1253
4	250.40	0.001252	0.04978	1082.31	2602.3	1087.31	2801.4	2.7964	6.0701
5	263.99	0.001286	0.03944	1147.81	2597.1	1154.23	2794.3	2.9202	5.9734
6	275.64	0.001319	0.03244	1205.44	2589.7	1213.35	2784.3	3.0267	5.8892
7	285.88	0.001351	0.02737	1257.55	2580.5	1267.00	2772.1	3.1211	5.8133
8	295.06	0.001384	0.02352	1305.57	2569.8	1316.64	2758.0	3.2068	5.7432
9	303.40	0.001418	0.02048	1350.51	2557.8	1363.26	2742.1	3.2858	5.6722
10	311.06	0.001452	0.018026	1393.04	2544.4	1407.56	2724.7	3.3596	5.6141
11	318.15	0.001489	0.015987	1433.70	2529.8	1450.10	2705.6	3.4295	5.5527
12	324.75	0.001527	0.014263	1473.00	2513.7	1491.30	2684.9	3.4962	5.4924
13	330.93	0.001567	0.012780	1511.10	2496.1	1531.50	2662.2	3.5606	5.4323
14	336.75	0.001611	0.011485	1548.60	2476.8	1571.10	2637.6	3.6232	5.3717
15	342.24	0.001658	0.010337	1585.60	2455.5	1610.50	2610.5	3.6848	5.3098
16	347.44	0.001711	0.009306	1622.70	2431.7	1650.10	2580.6	3.7461	5.2455
17	352.37	0.001770	0.008364	1660.20	2405.0	1690.30	2547.2	3.8079	5.1777
18	357.06	0.001840	0.007489	1698.90	2374.3	1732.00	2509.1	3.8715	5.1044
19	361.54	0.001924	0.006657	1739.90	2338.1	1776.50	2464.5	3.9388	5.0228
20	365.81	0.002036	0.005834	1785.60	2293.0	1826.30	2409.7	4.0139	4.9269
21	369.89	0.002207	0.004952	1842.10	2230.6	1888.40	2334.6	4.1075	4.8013
22	373.80	0.002742	0.003568	1961.90	2087.1	2022.20	2165.6	4.3110	4.5327
22.09	374.14	0.003155	0.003155	2029.60	2029.6	2099.30	2099.3	4.4298	4.4298

Temp. T °C	Volumen específico v m³/kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m³/kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m³/kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)
	P=0.01 MPa (45.81°C)				P=0.05 MPa (81.33°C)				P=0.10 MPa (99.63°C)			
Sat	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.24	2483.9	2645.9	7.5939	1.694	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.158	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736	2977.3	9.1002	0.82	2735	2976	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.49	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053	4641.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.382	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.26	4683.5	5409.5	10.5183
	P=0.20 MPa (120.23°C)				P=0.30 MPa (133.55°C)				P=0.40 MPa (143.63°C)			
Sat	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275	8.033	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130	3486	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704	8.777	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.469	1.4685	4052	4639.4	9.336
1100	3.168	4257	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.584	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467	5146.8	9.706
1300	3.63	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683	5409	10.011	1.8151	4682.8	5408.8	9.878

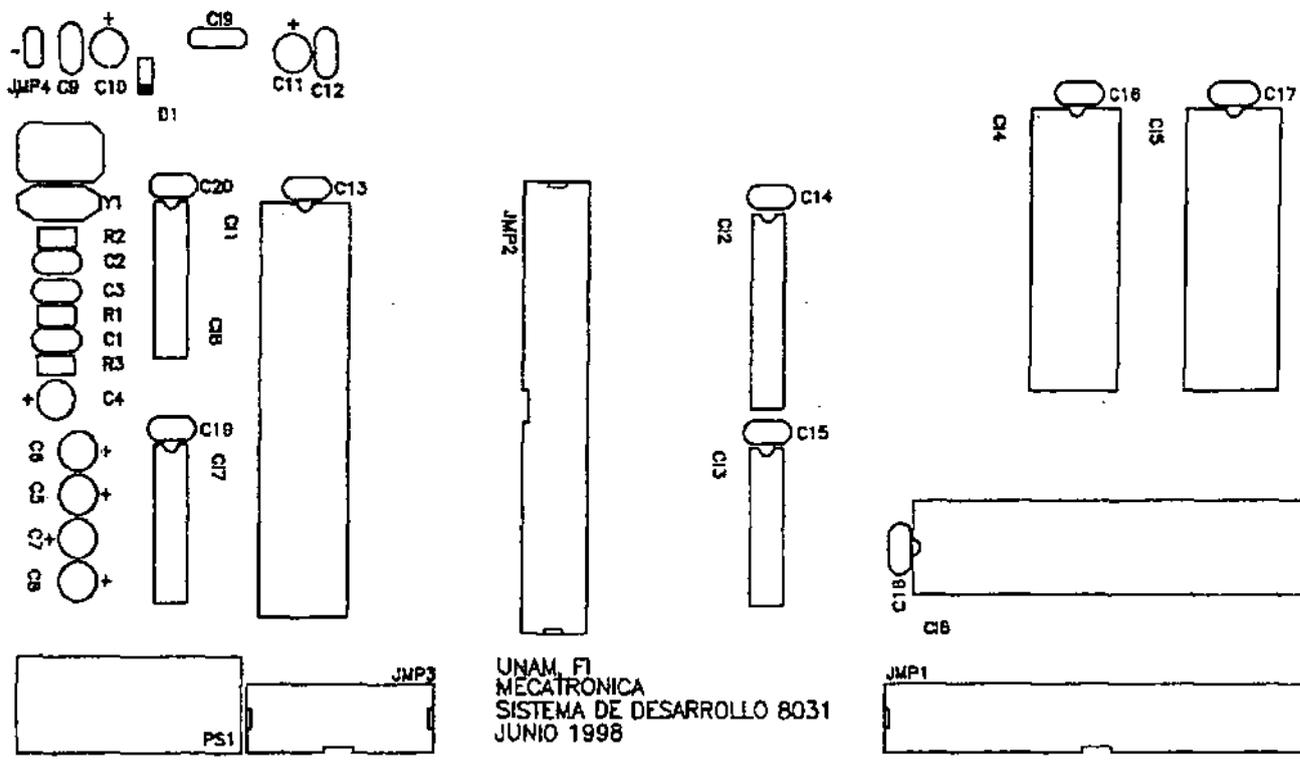
Temp. T °C	Volumen específico v m³/kg	Energía Interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m³/kg	Energía Interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m³/kg	Energía Interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)
	P=0.50 MPa (151.86°C)				P=0.60 MPa (158.85°C)				P=0.80 MPa (170.43°C)			
Sat	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.76	0.2404	2576.8	2769.1	6.8628
200	0.4249	2842.9	2855.4	7.0592	0.352	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.592	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	8.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.377
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.734	4051	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	0.7919	4255.6	4887.1	9.205
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.133	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575
	P=1.00 MPa (179.91°C)				P=1.20 MPa (187.99°C)				P=1.40 MPa (195.07°C)			
Sat	0.19444	2583.6	2778.1	6.5865	0.16633	2588.8	2784.8	6.5233	0.14084	2592.8	2790	6.4693
200	0.206	2621.9	2827.9	6.694	0.1693	2612.8	2815.9	6.5898	0.14302	2603.1	2803.3	6.4975
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.18234	2704.2	2935	6.8294	0.1635	2698.3	2927.2	6.7467
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.18228	2785.2	3040.4	6.9534
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.136
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.029	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.286	3294.4	3694.8	7.871
700	0.4478	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.116
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659	4153	8.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050	4637	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2984

Temp. T °C	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)
	P=1.60 MPa (201.41°C)				P=1.80 MPa (207.15°C)				P=2.00 MPa (212.42°C)			
Sat	0.1238	2596	2794	6.4218	0.11042	2598.4	2797.1	6.3794	0.09963	2600.3	2799.5	6.3409
225	0.13287	2644.7	2857.3	6.5518	0.11673	2636.6	2846.7	6.4808	0.10377	2628.3	2835.8	6.4147
250	0.14184	2692.3	2919.2	6.6732	0.12497	2686	2911	6.6066	0.1144	2679.6	2902.5	6.5453
300	0.15862	2781.1	3034.8	6.8844	0.14021	2776.9	3029.2	6.8226	0.12547	2772.6	3023.5	6.7664
350	0.17456	2866.1	3145.4	7.0694	0.15457	2863	3141.2	7.01	0.13857	2859.8	3137	6.9563
400	0.19005	2950.1	3254.2	7.2374	0.16847	2947.7	3250.9	7.1794	0.1512	2945.2	3247.6	7.1271
500	0.2203	3119.5	3472	7.539	0.1955	3117.9	3469.8	7.4825	0.17568	3116.2	3467.6	7.4317
600	0.25	3293.3	3693.2	7.808	0.222	3292.1	3691.7	7.7523	0.1996	3290.9	3690.1	7.7024
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2808	0.2742	3657.6	4151.2	8.2256	0.2467	3657	4150.3	8.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.27	3849.3	4389.4	8.3895
1000	0.3668	4049	4635.8	8.6938	0.326	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048	4634.6	8.5901
1100	0.3958	4253.7	4887	8.8837	0.3518	4253.2	4886.4	8.829	0.3166	4252.7	4885.9	8.78
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3398	4463.3	5142.9	8.9607
1300	0.4538	4679.9	5406	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679	5405.1	9.1329
	P=2.50 MPa (223.99°C)				P=3.00 MPa (233.90°C)				P=3.50 MPa (242.60°C)			
Sat	0.07998	2603.1	2803.1	6.2575	0.06668	2604.1	2804.2	6.1869	0.05707	2603.7	2803.4	6.1253
225	0.08027	2605.8	2806.3	6.2639								
250	0.087	2662.6	2880.1	6.4085	0.7058	2644	2644	6.2872	0.05872	2623.7	2829.2	6.1749
300	0.0989	2761.6	3008.8	6.6438	0.08114	2750.1	2750.1	6.539	0.06842	2738	2977.5	6.4461
350	0.10976	2851.9	3126.3	6.8403	0.09053	2843.7	2843.7	6.7428	0.07678	2835.3	3104	6.6579
400	0.1201	2939.1	3239.3	7.0148	0.09936	2932.8	2932.8	6.9212	0.08453	2926.4	3222.3	6.8405
450	0.13014	3025.5	3350.8	7.1746	0.10787	3020.4	3020.4	7.0834	0.09196	3015.3	3337.2	7.0052
500	0.13993	3112.1	3462.1	7.3234	0.11619	3108	3108	7.2338	0.09918	3103	3450.9	7.1572
600	0.1593	3288	3686.3	7.596	0.13243	3285	3285	7.5085	0.11324	3282.1	3678.4	7.4339
700	0.17832	3468.7	3914.5	7.8435	0.14838	3466.5	3466.5	7.7571	0.12699	3464.3	3908.8	7.6837
800	0.19816	3655.3	4148.2	8.072	0.16414	3653.5	3653.5	7.9862	0.14056	3651.8	4143.7	7.9134
900	0.2159	3847.9	4387.6	8.2853	0.1798	3846.5	3846.5	8.1999	0.15402	3845	4384.1	8.1276
1000	0.2346	4046.7	4633.1	8.4861	0.19541	4045.4	4045.4	8.4009	0.16743	4044.1	4630.1	8.3288
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6762	0.21098	4250.3	4250.3	8.5912	0.1808	4249.2	4881.9	8.5192
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.22652	4460.9	4460.9	8.772	0.19415	4459.8	5139.3	8.7
1300	0.2905	4677.8	5404	9.0291	0.24206	4676.6	4676.6	8.9442	0.20749	4675.5	5401.7	8.8723

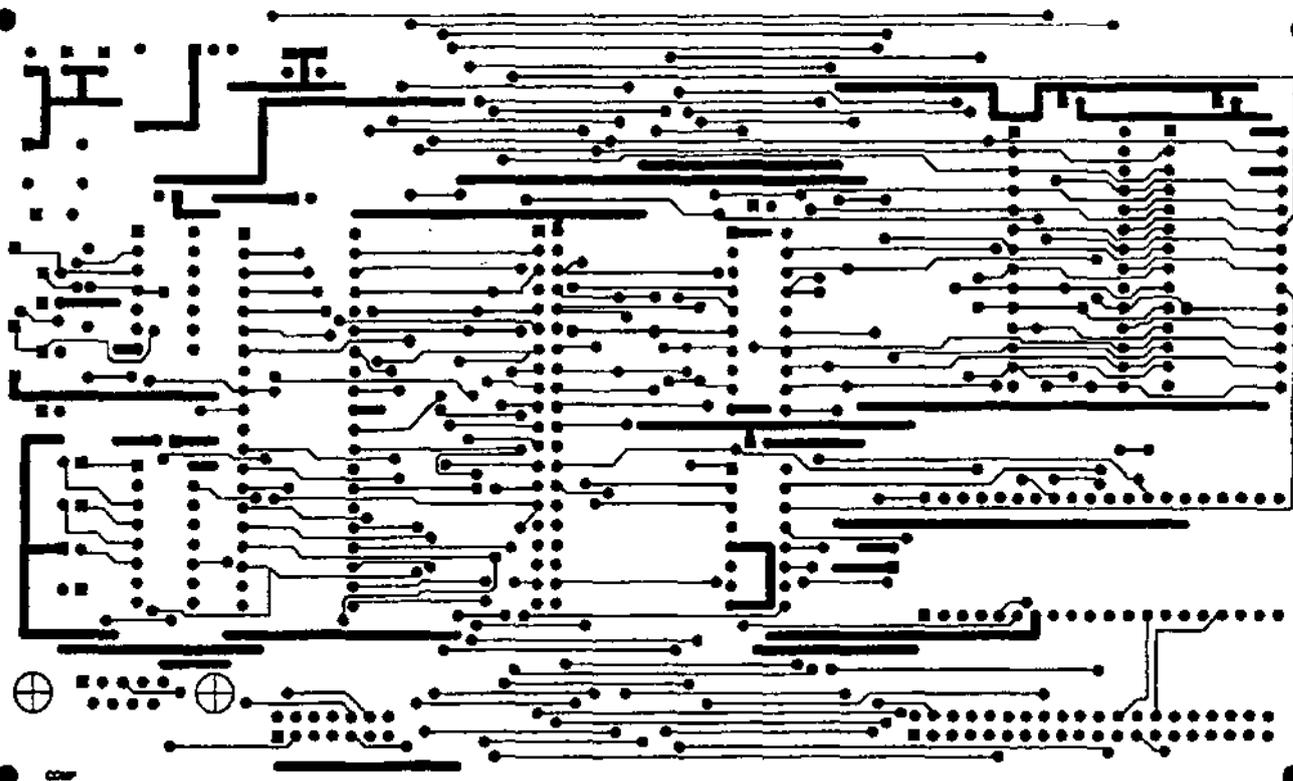
Temp. T °C	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)
	P=4.0 MPa (250.40°C)				P=4.5 MPa (257.49°C)				P=5.0 MPa (263.99°C)			
Sat	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.04406	2600.1	2798.3	6.0198	0.03944	2597.1	2794.3	5.9734
275	0.05457	2667.9	2886.2	6.2285	0.0473	2650.3	2863.2	6.1401	0.04141	2631.3	2838.3	6.0544
300	0.05884	2725.3	2960.7	6.3615	0.05135	2712	2943.1	6.2828	0.04532	2698	2924.5	6.2084
350	0.06645	2826.7	3092.5	6.5821	0.0584	2817.8	3080.6	6.5131	0.05194	2808.7	3068.4	6.4493
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.769	0.06475	2913.3	3204.7	6.7047	0.05781	2906.6	3195.7	6.6459
450	0.08002	3010.2	3330.3	6.9363	0.07074	3005	3323.3	6.8746	0.0633	2999.7	3316.2	6.8186
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.07651	3095.3	3439.6	7.0301	0.06857	3091	3433.8	6.9759
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.08765	3276	3670.5	7.311	0.07869	3273	3666.5	7.2589
700	0.11095	3462.1	3905.9	7.6198	0.09847	3459.9	3903	7.5631	0.08849	3457.6	3900.1	7.5122
800	0.12287	3650	4141.5	7.8502	0.10911	3648.3	4139.3	7.7942	0.09811	3646.6	4137.1	7.744
900	0.13469	3843.6	4382.3	8.0647	0.11965	3842.2	4380.6	8.0091	0.10762	3840.7	4378.8	7.9593
1000	0.14645	4042.9	4628.7	8.2662	0.13013	4041.6	4627.2	8.2108	0.11707	4040.4	4625.7	8.1612
1100	0.15817	4248	4880.6	8.4567	0.14056	4246.8	4879.3	8.4015	0.12648	4245.6	4878	8.352
1200	0.16987	4458.6	5138.1	8.6376	0.15098	4457.5	5136.9	8.5825	0.13587	4456.3	5135.7	8.5331
1300	0.18156	4674.3	5400.5	8.81	0.16139	4673.1	5399.4	8.7549	0.14526	4672	5398.2	8.7055
	P=6.0 MPa (275.64°C)				P=7.0 MPa (285.88°C)				P=8.0 MPa (295.06°C)			
Sat	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892	0.02737	2580.5	2772.1	5.8133	0.02352	2569.8	2758	5.7432
300	0.03616	2667.2	2884.2	6.0674	0.02947	2632.2	2838.4	5.9305	0.02426	2590.9	2785	5.7906
350	0.04223	2789.6	3043	6.3335	0.03524	2769.4	3016	6.2283	0.02995	2747.7	2987.3	6.1301
400	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408	0.03993	2878.6	3158.1	6.4478	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634
450	0.05214	2988.9	3301.8	6.7193	0.04416	2978	3287.1	6.6327	0.03817	2966.7	3272	6.5551
500	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803	0.04814	3073.4	3410.3	6.7975	0.04175	3064.3	3398.3	6.724
550	0.06101	3174.6	3540.6	7.0288	0.05195	3167.2	3530.9	6.9486	0.04516	3159.8	3521	6.8778
600	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677	0.05565	3260.7	3650.3	7.0894	0.04845	3254.4	3642	7.0206
700	0.07352	3453.1	3894.2	7.4234	0.06283	3448.5	3888.3	7.3476	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812
800	0.0816	3643.1	4132.7	7.6566	0.06981	3639.5	4128.2	7.5822	0.06097	3636	4123.8	7.5173
900	0.08959	3837.8	4375.3	7.8727	0.07669	3835	4371.8	7.7991	0.06702	3832.1	4368.3	7.7351
1000	0.09749	4037.8	4622.7	8.0751	0.0835	4035.3	4619.8	8.002	0.07301	4032.8	4616.9	7.9384
1100	0.10536	4243.3	4875.4	8.2661	0.09027	4240.9	4872.8	8.1933	0.07896	4238.6	4870.3	8.13
1200	0.11321	4454	5133.3	8.4474	0.09703	4451.7	5130.9	8.3747	0.08489	4449.5	5128.5	8.3115
1300	0.12106	4669.6	5396	8.6199	0.10377	4667.3	5393.7	8.5475	0.0908	4665	5391.5	8.4842

Temp. T °C	Volumen específico v m³/kg	Energía Interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m³/kg	Energía Interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m³/kg	Energía Interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)
	P=9.0 MPa (303.40°C)				P=10.0 MPa (311.06°C)				P=12.5 MPa (327.89°C)			
Sat	0.02048	2557.8	2742.1	5.6772	0.018026	2544.4	2724.7	5.6141	0.013495	2505.1	2673.8	5.4624
325	0.02327	2646.6	2856	5.8712	0.019861	2610.4	2809.1	5.7568				
350	0.0258	2724.4	2956.6	6.0361	0.02242	2699.2	2923.4	5.9443	0.016126	2624.6	2826.2	5.7118
400	0.02993	2848.4	3117.8	5.2854	0.02641	2832.4	3096.5	6.212	0.02	2789.3	3039.3	6.0417
450	0.0335	2955.2	3256.6	6.4844	0.02975	2943.4	3240.9	6.419	0.02299	2912.5	3199.8	6.2719
500	0.03677	3055.2	3386.1	6.6576	0.03279	3045.8	3373.7	6.5966	0.0256	3021.7	3341.8	6.4618
550	0.03987	3152.2	3511	6.8142	0.03564	3144.6	3500.9	6.7561	0.02801	3125	3475.2	6.629
600	0.04285	3248.1	3633.7	6.9589	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029	0.03029	3225.4	3604	6.781
650	0.04574	3343.6	3755.3	7.0943	0.04101	3338.2	3748.2	7.0398	0.03248	3324.4	3730.4	6.9218
700	0.04857	3439.3	3876.5	7.2221	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687	0.0346	3422.9	3855.3	7.0536
800	0.05409	3632.5	4119.3	7.4596	0.04859	3628.9	4114.8	7.4077	0.03869	3620	4103.6	7.2965
900	0.0595	3829.2	4364.8	7.6783	0.05349	3826.3	4361.2	7.6272	0.04267	3819.1	4352.5	7.5182
1000	0.06485	4030.3	4614	7.8821	0.05832	4027.8	4611	7.8315	0.04658	4021.6	4603.8	7.7237
1100	0.07016	4236.3	4867.7	8.074	0.06312	4234	4865.1	8.0237	0.05045	4228.2	4858.8	7.9165
1200	0.07544	4447.2	5126.2	8.2556	0.06789	4444.9	5123.8	8.2055	0.0543	4439.3	5118	8.0937
1300	0.08072	4662.7	5389.2	8.4284	0.07265	4460.5	5387	8.3783	0.05813	4654.8	5381.4	8.2717
	P=15.0 MPa (342.24°C)				P=17.5 MPa (354.75°C)				P=20.0 MPa (365.81°C)			
Sat	0.010337	2455.5	2610.5	5.3098	0.00792	2390.2	2528.8	5.1419	0.005834	2293	2409.7	4.9269
350	0.01147	2520.4	2692.4	5.4421								
400	0.015649	2740.7	2975.5	5.8811	0.012447	2685	2902.9	5.7213	0.009942	2619.3	2818.1	5.554
450	0.018445	2879.5	3156.2	6.1404	0.015174	2844.2	3109.7	6.0184	0.012695	2806.2	3060.1	5.9017
500	0.0208	2996.6	3308.6	6.3443	0.017358	2970.3	3274.1	6.2383	0.014768	2942.9	3238.2	6.1401
550	0.02293	3104.7	3448.6	6.5199	0.019288	3083.9	3421.4	6.423	0.016555	3062.4	3393.5	6.3348
600	0.02491	3208.6	3582.3	6.6776	0.02106	3191.5	3560.1	6.5866	0.018178	3174	3537.6	6.5048
650	0.0268	3310.3	3712.3	6.8224	0.02274	3296	3693.9	6.7357	0.019693	3281.4	3675.3	6.6582
700	0.02861	3410.9	3840.1	6.9572	0.02434	3398.7	3824.6	6.8736	0.02113	3386.4	3809	6.7993
800	0.0321	3610.9	4092.4	7.204	0.02738	3604.8	4081.1	7.1244	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544
900	0.03546	3811.9	4343.8	7.4279	0.03031	3804.7	4335.1	7.3507	0.02645	3797.5	4326.4	7.283
1000	0.03875	4015.4	4596.6	7.6348	0.03316	4009.3	4589.5	7.5589	0.02897	4003.1	4582.5	7.4925
1100	0.042	4222.6	4852.6	7.8283	0.03597	4216.9	4846.4	7.7531	0.03145	4211.3	4840.2	7.6874
1200	0.04523	4433.8	5112.3	8.0108	0.03876	4428.3	5106.6	7.936	0.03391	4422.8	5101	7.8707
1300	0.04845	4649.1	5376	8.184	0.04151	4643.5	5370.5	8.1093	0.03636	4638	5365.1	8.0442

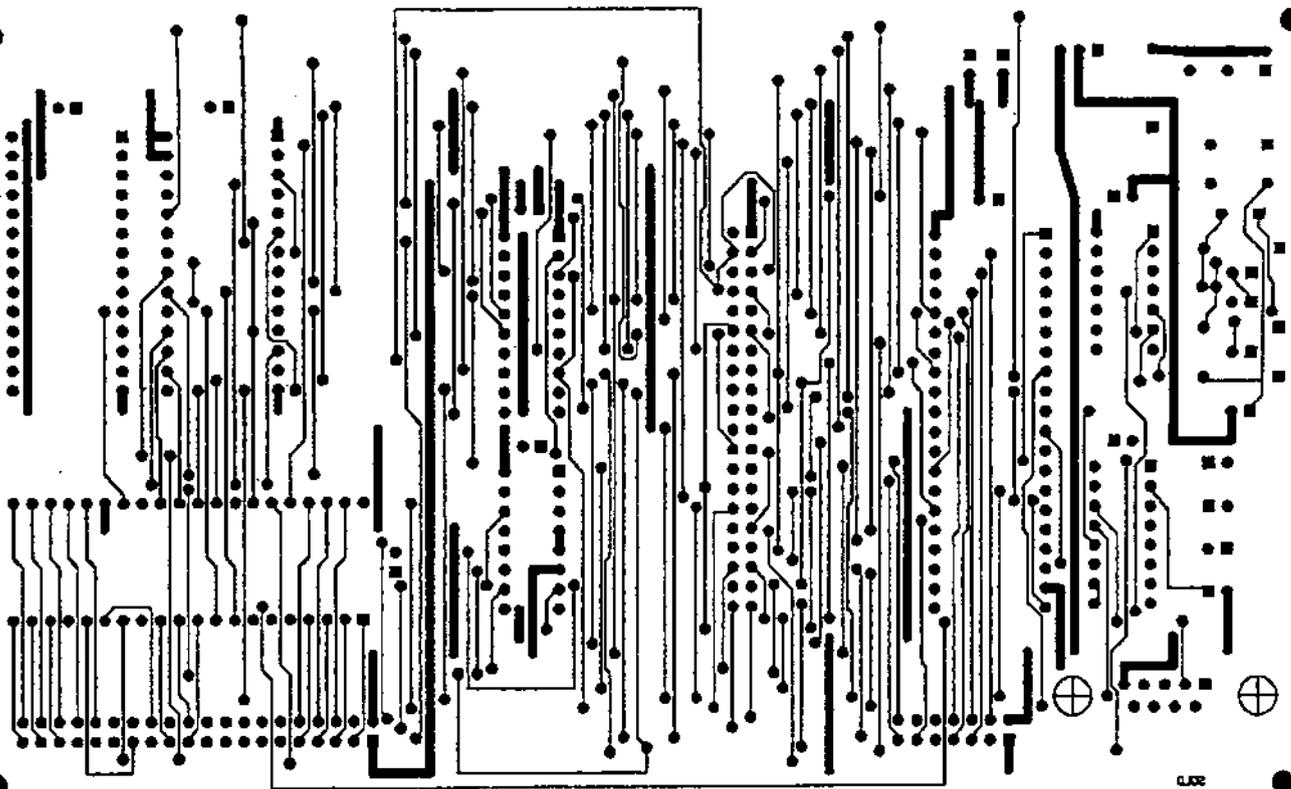
Temp. T °C	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)	Volumen específico v m <sup>3</sup> /kg	Energía interna u kJ/kg	Entalpía h kJ/kg	Entropía s kJ/(kg·K)
	P=25.0 MPa				P=30.0 MPa				P=35.0 MPa			
375	0.0019731	1798.7	1848	4.032	0.0017892	1737.8	1791.5	3.9305	0.0017003	1702.9	1762.4	3.8722
400	0.006004	2430.1	2580.2	5.1418	0.00279	2067.4	2151.1	4.4728	0.0021	1914.1	1987.6	4.2126
425	0.007881	2609.2	2806.3	5.4723	0.005303	2455.1	2614.2	5.1504	0.003428	2253.4	2373.4	4.7747
450	0.009162	2720.7	2949.7	5.6744	0.006735	2619.3	2821.4	5.4424	0.004961	2498.7	2672.4	5.1962
500	0.011123	2884.3	3162.4	5.9592	0.008678	2820.7	3081.1	5.7905	0.006927	2751.9	2994.4	5.6282
550	0.012724	3017.5	3335.6	6.1765	0.010168	2970.3	3275.4	6.0342	0.008345	2921	3213	5.9026
600	0.014137	3137.9	3491.4	6.3602	0.011446	3100.5	3443.9	6.2331	0.009527	3062	3395.5	6.1179
650	0.015433	3251.6	3637.4	6.5229	0.012596	3221	3598.9	6.4058	0.010575	3189.8	3559.9	6.301
700	0.016646	3361.3	3777.5	6.6707	0.013661	3335.8	3745.6	6.5606	0.011533	3309.8	3713.5	6.4631
800	0.018912	3574.3	4047.1	6.9345	0.015623	3555.5	4024.2	6.8332	0.013278	3536.7	4001.5	6.745
900	0.021045	3783	4309.1	7.168	0.017448	3768.5	4291.9	7.0718	0.014883	3754	4274.9	6.9386
1000	0.0231	3990.9	4568.5	7.3802	0.019196	3978.8	4554.7	7.2867	0.01641	3966.7	4541.1	7.2064
1100	0.02512	4200.2	4828.2	7.5765	0.020903	4189.2	4816.3	7.4845	0.017895	4178.3	4804.6	7.4037
1200	0.02711	4412	5059.9	7.7605	0.022589	4401.3	5079	7.6692	0.01936	4390.7	5068.3	7.591
1300	0.0291	4626.9	5354.4	7.9342	0.024266	4616	5344	7.8432	0.020815	4605.1	5333.6	7.7653
	P=40.0 MPa				P=50.0 MPa				P=60.0 MPa			
375	0.0016407	1677.1	1742.8	3.829	0.0015594	1638.6	1716.6	3.7639	0.0015028	1609.4	1699.5	3.7141
400	0.0019077	1854.6	1930.9	4.1135	0.0017309	1788.1	1874.6	4.0031	0.0016335	1745.4	1843.4	3.9318
425	0.002532	2096.9	2198.1	4.5029	0.002007	1959.7	2060	4.2734	0.0018165	1892.7	2001.7	4.1626
450	0.003693	2364.1	2512.8	4.9459	0.002486	2159.6	2284	4.5884	0.002085	2053.9	2179	4.4121
500	0.005622	2678.4	2903.3	5.47	0.003892	2525.5	2720.1	5.1726	0.002956	2390.6	2567.9	4.9321
550	0.006984	2869.7	3149.1	5.7785	0.005118	2763.6	3019.5	5.5485	0.003956	2658.8	2896.2	5.3441
600	0.008094	3022.6	3346.4	6.0144	0.006112	2942	3247.6	5.8178	0.004834	2861.1	3151.2	5.6452
650	0.009063	3157	3520.6	6.2054	0.006966	3093.5	3441.8	6.0342	0.005595	3028.8	3364.5	5.8829
700	0.009941	3283.6	3681.2	6.375	0.007727	3230.5	3616.8	6.2189	0.006272	3177.2	3553.5	6.0824
800	0.011523	3517.8	3978.7	6.6662	0.009076	3479.8	3933.6	6.529	0.007459	3441.5	3889.1	6.4109
900	0.012962	3739.4	4257.9	6.915	0.010283	3710.3	4224.4	6.7882	0.008508	3681	4191.5	6.6805
1000	0.014324	39514.6	4527.6	7.1356	0.011411	3930.5	4501.1	7.0146	0.00948	3906.4	4475.2	6.9127
1100	0.015642	4167.4	4793.1	7.3364	0.012496	4145.7	4770.5	7.2184	0.010409	4124.1	4748.6	7.1195
1200	0.01694	4380.1	5057.7	7.5224	0.013561	4359.1	5037.2	7.4058	0.011317	4338.2	5017.2	7.3083
1300	0.018229	4594.3	5323.5	7.6969	0.014616	4572.8	5303.6	7.5808	0.012215	4551.4	5284.3	7.4837



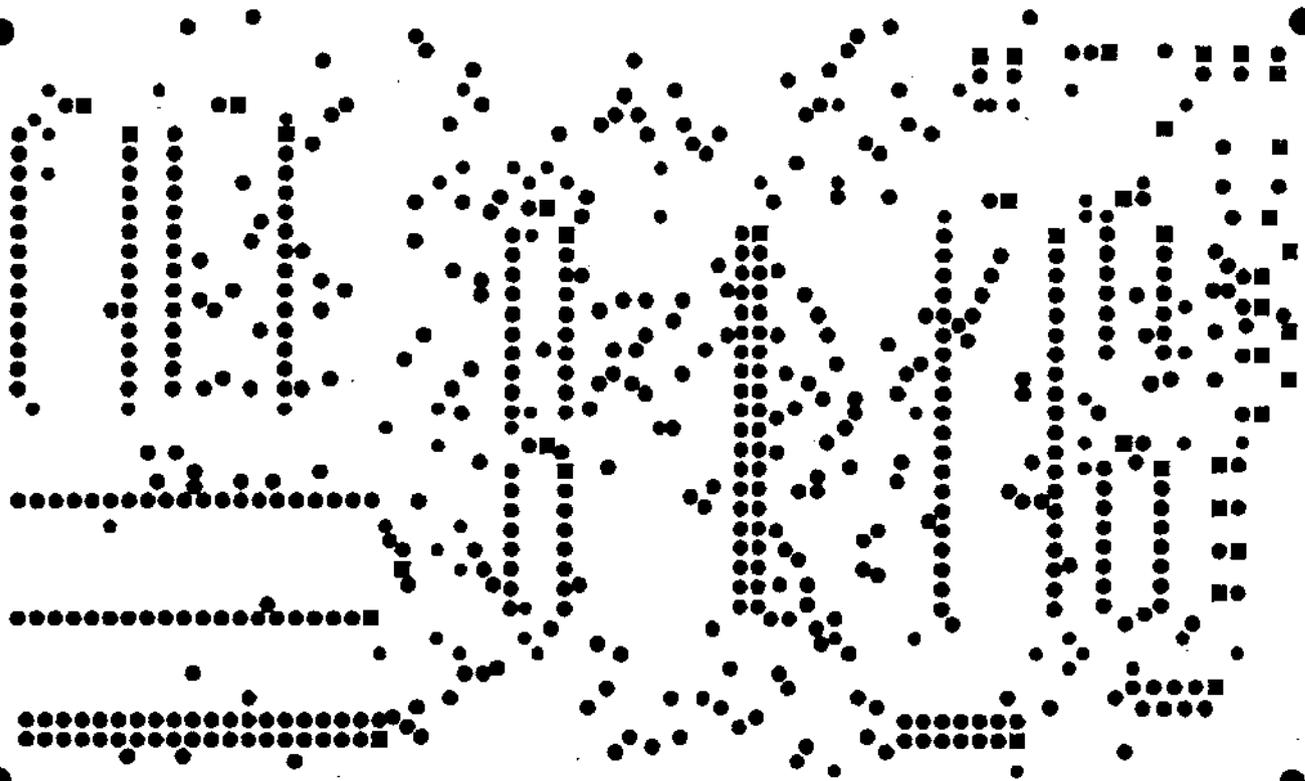
Máscara de símbolos



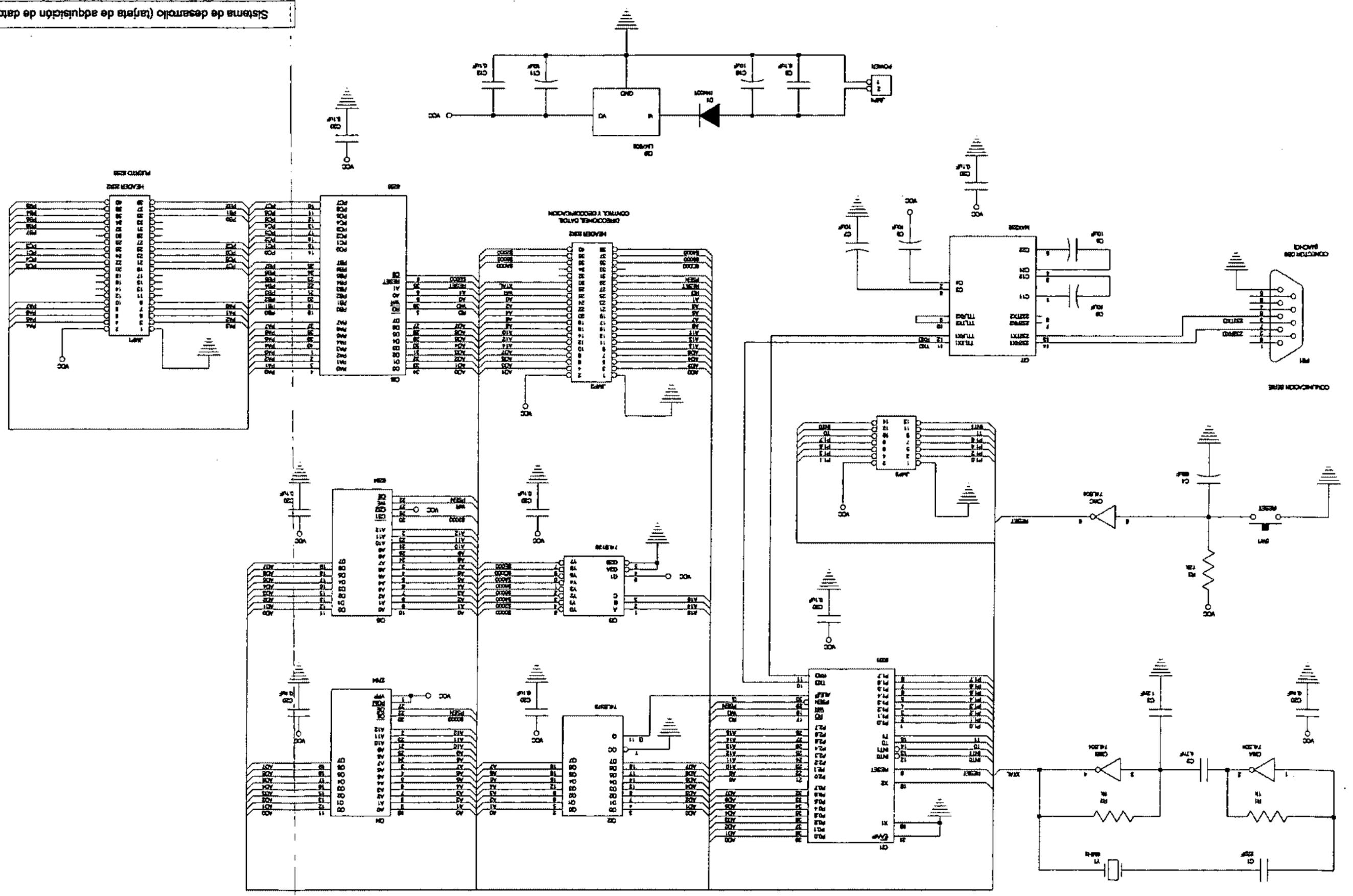
Plano eléctrico de componentes



Plano eléctrico de soldadura



Máscara para barniz



## APÉNDICE 6

# COMPONENTES DE UNA COMPUTADORA

Aquí se presentan componentes que tienen una importancia particular por las funciones que realizan en una computadora. Estos componentes son un conjunto de chips cada uno con características particulares: microprocesador, memoria principal, adaptador de interfase entrada-salida, controlador de interrupciones, unidad de acceso directo a memoria y adaptador de comunicaciones.

A continuación se menciona a cada uno de ellos.

### Microprocesador

Se conoce también como unidad central de proceso o CPU (*Central Processing Unit*), ya que "el conjunto de los circuitos utilizados para el funcionamiento de una computadora elemental está contenido en este componente"<sup>1</sup>. Así, el microprocesador cuenta, en general, con los siguientes circuitos:

- **Contador de programa (PC – Program Counter)** – Contiene las diferentes direcciones de la memoria principal correspondientes a la posición de las instrucciones cuya lectura y análisis sucesivos constituyen el desarrollo del programa.
- **Registro de dirección de memoria (AR – Address Register)** – Contiene la dirección de la memoria de donde o hacia donde se transfiere la información del microprocesador o de las unidades de interconexión.
- **Registro de datos de memoria (DR – Data Register)** – Aquí se guarda la información de entrada o de salida de o hacia la memoria principal, o bien las unidades de interconexión.
- **Registro de instrucción (IR – Instruction Register)** – Una instrucción de programa se divide siempre en dos partes:
  - El código de operación, que constituye el comando o la orden que precisa el tratamiento que se dará a la información, y
  - La dirección del operando, que suministra la información acerca de la ubicación en la memoria principal de los datos sobre los cuales se lleva a cabo la operación.

En el registro de instrucción se guarda el código de operación de la instrucción leída.

- **Registro de dirección del operando (DC – Data Counter)** – Aquí se guarda la segunda parte de la instrucción leída, es decir, la dirección del operando.
- **Acumulador (ACC o A – Accumulator)** – Este es el registro de trabajo, que sirve como una ubicación temporal para guardar operandos o resultados de alguna operación.
- **Unidad aritmético-lógica (ALU – Arithmetic and Logic Unit)** – Se trata de circuitos combinatoriales, que realizan operaciones aritméticas y lógicas de acuerdo con lo que establecen las señales de control activadas luego de la decodificación del código de operación de una instrucción.

---

<sup>1</sup> C. Pariot; "Introducción a los microprocesadores y microordenadores"; Gustavo Gili; España, 1988; p. 35

- **Registro de estado (flags)** – Contiene una serie de banderas que indica el estado interno del microprocesador después de cada operación, en donde dicho estado se toma del resultado recuperado en el acumulador. Lo más común es encontrar las siguientes banderas en el registro de estado:
  - Resultado nulo (Z – Zero)
  - Signo del resultado (S – Sign) – cero para resultado negativo y uno para positivo.
  - Paridad del resultado (E – Even) – cero para resultado par y uno para impar.
  - Acarreo (C – Carry) – Refleja el acarreo de una operación aritmética de adición o sustracción.
  - Desbordamiento (O – Overflow) – Indica que la longitud del resultado sobrepasa la capacidad del acumulador.
  - Interrupción (I – Interrupt) – Autoriza la aceptación de peticiones de interrupción.
- **Apuntador de pila (SP – Stack Pointer)** – Es un registro que contiene la dirección del último valor inscrito en la pila de direcciones. La pila de direcciones puede servir para ruptura de secuencias en el programa cuando trabaja bajo la estructura LIFO (*Last In First Out*) o para el manejo de colas cuando utiliza la estructura FIFO (*First In First Out*).

Para que la información pueda pasar de un circuito a otro de los mencionados anteriormente, y para que el microprocesador pueda enviar información a otros chips, es necesario tener enlaces entre ellos, estos enlaces se conocen como buses, y podemos encontrarnos con los siguientes tipos:

- **Bus interno** – Se trata de un bus localizado en el interior del microprocesador y que conecta a todos los circuitos de éste entre ellos, menos al registro de estado que se conecta directamente con el acumulador. Por lo general se representa con las siglas DB (*Data Bus*).
- **Bus de direcciones** – Es un bus externo al microprocesador y le permite a éste direccionar alguna palabra de información en la memoria externa o direccionar una unidad periférica. Su contenido es, evidentemente, una dirección.
- **Bus de datos** – También es un bus externo y contiene la información que el microprocesador envía o recibe hacia o desde la memoria externa o alguna unidad periférica.
- **Bus de control** – Es el tercer tipo de bus externo y contiene todas las líneas de control y de estado, como pueden ser:
  - Orden de lectura o de escritura (RW – *Read/Write*)
  - Petición de interrupción (IR – *Interrupt Request*)
  - Aceptación de la interrupción (IA – *Interrupt Acknowledge*)
  - Validación de la dirección de memoria (VMA – *Valid Memory Address*)
  - Inhibición (I – *Inhibition*)
  - Parada del microprocesador (H – *Half*)
  - Reinicio del microprocesador (R – *Reset*)
  - Arranque del microprocesador (S – *Start*)
  - Reloj

Por supuesto, lo anterior es un esquema general de un microprocesador y existen variaciones en el mercado.

## Memoria principal

Existen dos tipos de chips de memoria:

- **de sólo lectura (ROM – *Read Only Memory*)**, que suele utilizarse para grabar las instrucciones de un programa y algunas constantes. A su vez, existen diferentes tipos de memoria de sólo lectura. La ROM como tal contiene información del programa desde su fabricación. La PROM no contiene información desde su fabricación y permite grabar un programa una sola vez. La RPRM que es una memoria ROM con la cualidad de poder modificar su contenido varias veces, un tipo particular de estas es la EPROM que se borra mediante exposición directa a rayos ultravioleta.
- **de lectura-escritura (RAM – *Random Access Memory*)**. Se utiliza comúnmente para guardar los operandos. Existe la RAM estática que almacena la información mientras se mantenga la tensión de alimentación o alguna operación modifique su contenido; y la RAM dinámica que sólo almacena la información durante unos cuantos milisegundos, por lo que necesitan una operación de refresco para mantener la información por más tiempo.

En la mayoría de los sistemas nos encontraremos con una combinación de estos dos tipos de memoria.

Una parte interesante relacionada con la memoria es la manera de direccionar las celdas. Existen diferentes maneras de hacerlo, y las más comunes son las siguientes:

- **Direccionamiento directo extendido** – Se llama así, porque se emplean todas las palabras de dirección (por lo general se necesitan 3 palabras de 8 bits cada una).
- **Direccionamiento indirecto** – Permite conocer el valor absoluto de la dirección tras la lectura de una posición intermedia situada en la memoria RAM.
- **Direccionamiento indexado** – La dirección absoluta se obtiene por medio del cálculo de la suma del contenido de las tres palabras de dirección y el contenido del registro índice XR (*index register*). El direccionamiento indexado se puede combinar con el direccionamiento indirecto para dar lugar a dos subtipos de direccionamiento:
  - **Direccionamiento preindexado**: Consta de un direccionamiento indexado seguido de un direccionamiento indirecto.
  - **Direccionamiento postindexado**: Consta de un direccionamiento indirecto seguido de un direccionamiento indexado.
- **Direccionamiento relativo** – Permite conocer el valor absoluto de la dirección del operando, tras el cálculo de la suma del contenido de la palabra siguiente al código de operación (llamada desplazamiento) y el contenido del contador del programa. El desplazamiento puede ser negativo o positivo dependiendo del valor del bit más significativo del octeto.

## Adaptador de interfase entrada-salida

Conocido como PIA por sus siglas en inglés (*Parallel Input-Output Interface Adapter*), es una unidad de interconexión, es decir, permite asegurar, mediante el control del programa, la transferencia de datos entre la unidad central de proceso y una unidad periférica. Generalmente, cada chip PIA maneja la transeferencia de información entre la unidad central de proceso y una o dos unidades periféricas, por lo que contiene una o dos líneas de control que permiten a la unidad emisora contrastar los datos enviados y a la unidad receptora aceptarlos.

En realidad, existe una gran variedad de tipos de chips PIA; algunos tendrán varias líneas de control lo que permitirá, tras una personalización de dichas líneas, diferentes modos de transferencia de control y de estado.

### **Controlador de interrupciones**

Este controlador, llamado PIC (Priority Interruption Controller) permite manejar las peticiones de interrupción. Las interrupciones son señales generadas, a menudo, por una unidad periférica y que invitan a la unidad central de proceso a desarrollar un programa especial. En tal caso, el programa en curso es interrumpido para permitir que se ejecute el programa especial de procedimiento de la petición de interrupción.

El controlador PIC se encarga de administrar la prioridad de las peticiones de interrupción, a fin de presentar a la unidad central de proceso una sola interrupción a la vez. Cuando una petición de interrupción es aceptada por el microprocesador, el PIC avisa a la unidad periférica, y la transmisión de datos da inicio.

### **Unidad de acceso directo a memoria**

Esta unidad es conocida como DMA (Direct Memory Access), y permite transferir directa y rápidamente numerosos datos entre una unidad periférica y la memoria RAM sin paso intermedio por el microprocesador.

Para llevar a cabo esta transferencia de información, el registro de dirección del DMA se carga con la dirección de inicio, es decir, del primer dato a transmitir; luego el contador de palabras del DMA se carga con el número de datos a transmitir. Después de cada transmisión de datos, el registro de dirección y el contador del DMA se incrementa y decrementa respectivamente, hasta que el contador alcance un valor nulo.

Para poder realizar estas funciones, el chip DMA también toma alternativamente un ciclo del reloj, tiempo durante el cual inhibe al microprocesador.

### **Adaptador de comunicaciones**

Este adaptador se conoce como SCA (Serial Input-Output Communication Adapter). La finalidad principal es permitir a la unidad central de proceso intercambiar datos con otras unidades centrales de proceso, que pueden encontrarse geográficamente a largas distancias. Para ello se emplean las interfaces de comunicación como los descritos en el capítulo anterior, en donde se vio que para largas distancias, lo más conveniente es emplear una interfaz para comunicación en serie.

Existe un registro principal dentro de este adaptador que permite, en transmisión, enviar una información en serie sobre la línea después de la transmisión de cada palabra desde el microprocesador y la serialización; en recepción, permite recibir una información en serie de la línea, después realizar la conversión de cada palabra a paralelo y por último transmitirla al microprocesador.

# APÉNDICE 7

## CÓDIGO FUENTE PARA EL PROCESADOR 8051

El siguiente es el código fuente utilizado en la tarjeta de adquisición de datos para que el procesador 8051 pudiera comunicarse con la computadora, recibir la petición de lectura de algún puerto y pedirle al convertidor analógico-digital que procesara la señal para después devolver un valor numérico a la computadora.

```
; PROGRAMA QUE PERMITE ENVIAR A LA COMPUTADORA, LA SEÑAL DIGITAL
; QUE SE SOLICITE DE UNO DE CUATRO CONVERTIDORES ANALOGICO-DIGITALES
; CADA UNO CON SIETE ENTRADAS AL PUERTO SERIAL.
```

```
; DECLARACION DE VARIABLES TIPO BIT
```

```
BIT_CONV EQU 7DH
BIT_TRAN EQU 7EH
BIT_REC EQU 7FH
```

```
; RUTINAS DE INTERRUPCION
```

```
ORG 0000H
LJMP 0040H
```

```
ORG 0003H ; Interrupción externa 0
LJMP INTEXT ; Rutina de interrupción externa 0
```

```
ORG 0023H ; Interrupción puerto SERIAL
LJMP SERIAL ; Rutina de interrupción del puerto SERIAL
```

```
; PROGRAMA DE INICIALIZACION
```

```
ORG 0040H
MOV R0,#7FH
BORRAR: MOV @R0,#00H
DJNZ R0,BORRAR
MOV SP,#6FH
```

```
; Inicializa el TIMER1 en modo de AUTOCARGA
```

```
MOV TH1,#239 ; Transmisión a 2400 BAUDs
MOV TMOD,#20H ; Modo AUTOCARGA
SETB TR1 ; Habilita el conteo
```

```
; Inicializa el puerto SERIAL
```

```
ORL PCON,#80H ; Mascara para poner SMOD=1

CLR RI ; Apagar BANDERAS de interrupción
CLR TI ; RI = recepción TI = transmisión

CLR SM2 ; Deshabilita modo multiproceso

CLR SM0 ; Habilita el modo de 8 BITS UART
```

```

        SETB SM1          ; con velocidad variable

        SETB REN          ; Habilita la recepción

; Inicializa la interrupción externa 0

        SETB ITO          ; Activación por flanco

; Habilita INTERRUPCIONES

        SETB EX0          ; Habilita interrupción externa 0
        SETB ES           ; Habilita interrupción particular SERIAL
        SETB EA           ; Habilita interrupción general

; PROGRAMA PRINCIPAL

ESPERA:  JNB   BIT_REC,ESPERA ; Espera a recibir un dato por el serial
         MOV   A,SBUF
         CLR   BIT_REC
         MOV   B,#08H
         DEC   A
         DIV   AB
UNO:     CJNE  A,#00,DOS      ; Escoge la dirección que corresponde
         MOV   DPTR,#4000H   ; al ADC según la señal que se pida, la
         LJMP CONVIERTE     ; cual puede ser una de 32
DOS:     CJNE  A,#01,TRES
         MOV   DPTR,#6000H
         LJMP CONVIERTE
TRES:    CJNE  A,#02,CUATRO
         MOV   DPTR,#8000H
         LJMP CONVIERTE
CUATRO:  CJNE  A,#03,ESPERA
         MOV   DPTR,#0A000H
CONVIERTE: MOV   A,B
         MOVX  @DPTR,A       ; Pide la conversión al ADC
AGUANTA1: JNB   BIT_CONV,AGUANTA1 ; Espera la interrupción de fin de
         CLR   BIT_CONV     ; la conversión
ENVIA:   MOVX  A,@DPTR
         MOV   SBUF,A       ; Envía el dato al puerto serial
AGUANTA2: JNB   BIT_TRAN,AGUANTA2 ; Espera el fin de la transmisión
         CLR   BIT_TRAN
         LJMP  ESPERA

; SUBROUTINAS DE INTERRUPCION

SERIAL:  JNB   TI,SER1
         SETB  BIT_TRAN
         CLR   TI
         LJMP  SER2
SER1:    JNB   RI,SER2
         SETB  BIT_REC
         CLR   RI
SER2:    RETI
INTEXT:  SETB  BIT_CONV
         RETI

```

; SUBROUTINAS DEL PROGRAMA PRINCIPAL

```
PAUSA:    MOV    R0, #06H
          MOV    R1, #17H
          MOV    R2, #13H
PAUS1:    DJNZ   R2, PAUS1
          DJNZ   R1, PAUS1
          DJNZ   R0, PAUS1
          RET
END       0000H
```

## BIBLIOGRAFÍA

1. C. Pariot; "Introducción a los microprocesadores y microordenadores"; Gustavo Gili; 1ª edición; España, 1988
2. Çengel, Yunus; Boles, Michael; "Termodinámica"; Mc Graw Hill; 2ª edición; Colombia, 1998
3. Cisneros Rodríguez, Rubén; "Acondicionamiento de las señales eléctricas en el proyecto sistema de control distribuido para la central termoeléctrica de ciclo combinado en Dos Bocas Veracruz"; Tesis Licenciatura (Ingeniero Mecánico Electricista) UNAM, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón; México: El autor, 1990
4. Comisión Federal de Electricidad; "Del fuego a la energía nuclear"; Cronográfica; 4ª edición; México, 1989
5. Cooper, William; Helfrick, Albert; "Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición"; Prentice Hall; 1ª edición; México, 1991
6. Creus, Antonio; "Instrumentación y control"; Alfaomega-Marcombo; 6ª edición; México, 1998
7. Cripps, Martin; "Computer interfacing"; Edward Arnold; 1ª edición; Gran Bretaña, 1989
8. Gamow, George; "Uno, dos, tres... Infinito"; Espasa-Calpe; 1ª edición; Argentina, 1948
9. González Villela, Víctor; "Diseño Mecatrónico, guía de clase"; Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.; México, 1997
10. Hernández Hernández, Jenner; "Selección de un ciclo combinado de turbina de vapor y gas"; Tesis Licenciatura (Ingeniero Mecánico Electricista) UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán; México: El autor, 1981
11. Holman, Jack; "Métodos experimentales para ingenieros"; Mc Graw Hill; 2ª edición; México, 1994
12. Intel Corporation; "8-bit Embedded controller handbook"; Estados Unidos, 1990
13. López Fernández, Vicente et al.; "Prácticas del laboratorio de máquinas térmicas"; Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.; México
14. Luque Luna, Alberto; "Instrumentación, control y su aplicación a una planta de vapor"; Tesis Licenciatura (Ingeniero Mecánico Electricista) UNAM, Facultad de Ingeniería; México: El autor, 1979

15. Orilia, Lawrence; "Las computadoras y la información"; Mc Graw Hill; 2ª edición; México, 1990
16. Pallás Areny, Ramón; "Sensores y acondicionadores de señal"; Marcombo; 2ª edición; España, 1994
17. Quezada Cano, José Humberto; Quezada Cano, Enrique Francisco; "Conveniencia económica de la conversión a ciclo combinado gas-vapor de una planta eléctrica turbogas en ciclo abierto"; Tesis Licenciatura (Ingeniero Mecánico Electricista) Universidad Anáhuac, Escuela de Ingeniería; México: El autor, 1993
18. Steven H., Mark; "La esencia de Visual Basic 4"; Prentice Hall; 1ª edición; México, 1996
19. Tompkins, Willis; Webster, John; "Interfacing sensors to the IBM PC"; Prentice Hall; 1ª edición; Estados Unidos, 1988
20. Wilson, Jerry D.; "Física con aplicaciones"; Mc Graw Hill; 2ª edición; México, 1990