

**INENCO**  
**Instituto de Investigación en Energías no Convencionales**

**CONICET**  
**Universidad Nacional de Salta**

**Programa SIMUSOL**  
**TUTORIAL**

**Termodinámica, Mecánica, Electricidad**

**Luis Saravia y Dolores Alía**

**Noviembre del 2016**

# INDICE

<b>CAPITULO 1.- INTRODUCCION</b>	<b>4</b>
1.1.- LOS SISTEMAS TERMICOS A ESTUDIAR	5
1.2.- EL PROGRAMA DIA	7
1.3.- LA REPRESENTACIÓN DE LOS FLUJOS	9
1.4.- LAS MASAS TERMICAS	14
1.5.- FUENTES DE TEMPERATURAS	15
1.6.- NOMBRES DE TEMPERATURAS Y FLUJOS.	16
1.7.- EL CALCULO CON EL SIMUSOL	17
<b>CAPITULO 2.- CONCEPTOS AVANZADOS</b>	<b>20</b>
2.1.- TABLAS Y ARCHIVOS	20
2.2.- LAS VARIABLES	22
2.3.- LOS PARÁMETROS, DERIVADAS	22
2.4.- LAS FUNCIONES	24
2.5.- INSERCIÓN DE FIGURAS DEL DIA EN EL WORD	25
2.6.- COMENTARIOS Y CONTROLES	25
2.6.- LOS MODELOS	26
<b>CAPITULO 3.- OTROS SISTEMAS FISICOS</b>	<b>26</b>
3.1 – INTRODUCCIÓN	26
3.2.- LOS SISTEMAS TERMOELÉCTRICOS	27
<b>CAPITULO 4.- LOS SISTEMAS MECÁNICOS</b>	<b>32</b>
4.1.- UNA MASA PUNTUAL SOBRE UNA RECTA.	32
4.2.- MOVIMIENTO DE UNA MASA PUNTUAL EN UN PLANO VERTICAL	34
4.3.- EL TRANSFORMADOR	38
4.4.- SIMULACIÓN DE UN TRANSFORMADOR MEDIANTE SIMUSOL	39
4.5.- CILINDRO ROTANDO BAJO LA ACCIÓN DE UNA MASA QUE CAE.	40
4.6.- MASA EMPUJADA POR UN GAS CALIENTE DENTRO DE UN TUBO	43

## **CAPITULO 5.- EJERCICIOS**

**48**

5.1.- EJERCICIOS PARA RESOLVER EN CLASE

**48**

5.2.- RESOLUCION DE LOS PROBLEMAS PROPUESTOS

**50**

# CAPITULO 1.- INTRODUCCION

El SIMUSOL es un programa que simula numéricamente el funcionamiento transitorio de distintos sistemas físicos, ya sea térmicos, eléctricos, mecánicos, con aire húmedo o combinaciones de los mismos. Puede ser aplicado al estudio de los diversos sistemas solares tales como los calentadores de agua, cocinas, secadores, desalinizadores, equipos fotovoltaicos, generadores térmicos de vapor y o electricidad, edificios y otros.

El programa ha sido preparado por Luis Saravia, Dolores Alía de Saravia y Diego Saravia del INENCO, Universidad Nacional de Salta-CONICET, Argentina, usando diversos programas ya existentes y creando las interfaces necesarias en el lenguaje Perl. Toda la programación se realiza bajo la licencia GPL que permite el uso libre del Simusol en el entorno de sistema operativo GNU-Linux. Actualmente existe una versión libre del sistema operativo Linux, llamado Ubuntu, al que le ha sido agregado el Simusol y se ha instalado en un “pendrive”. El mismo puede instalar el Linux en una computadora cuyo sistema operativo es Windows sin introducir cambios en el mismo cuando se usa el Simusol. De esa forma el programa puede ejecutarse en una máquina con otro sistema operativo, como el Windows, sin que el contenido de la misma sea alterado. Una vez que se termine el trabajo se retira el Linux. De acuerdo a la costumbre de hablar de un CD-Live, se podría llamarlo “Pendrive-Live”

El mismo también contiene un manual completo del Simusol y un tutorial con el cual se puede aprender a usarlo. Se dispone de una página web, [www.simusol.org.ar](http://www.simusol.org.ar), en la que se puede encontrar una información más completa con numerosos ejemplos de utilidad.

Recomendamos que el lector instale el programa, ya sea bajo Linux o usando el Pendrive-Live que se suministre, y vaya practicando el uso del programa a medida que avanza en la lectura del tutorial.

El Simusol utiliza como base para realizar los cálculos un programa llamado Sceptre, que evalúa circuitos eléctricos y los otros sistemas, como los térmicos, se estudian utilizando la equivalencia existente entre los dos tipos de sistemas. El Sceptre fue creado en los años 70 para su uso en computadoras grandes de tipo “mainframe”, pero en los 90 el Prof. Novender (Novender, 1998) lo adaptó para su uso con el sistema operativo Linux en las minicomputadoras de uso generalizado en la actualidad. El Sceptre ha sido preparado en lenguaje Fortran. Es un programa potente que permite su aplicación a casos complicados que tienen en cuenta diversos aspectos como ser los circuitos no lineales, el uso de modelos, etc.

Por nuestra parte hemos decidido utilizar una interfaz gráfica para la entrada de datos que permita una interacción sencilla con el programa, pudiendo entrar los datos necesarios para su funcionamiento en forma sencilla y realizar cambios con facilidad. A esos efectos se utilizó el programa Dia que permite el trazado de elementos geométricos y segmentos que los unen formando diagramas. También es capaz de permitir la incorporación de los íconos que sean necesarios para representar los sistemas térmicos.

Por último se utiliza el programa Gnuplot para presentar los resultados en forma gráfica.

Los tres programas trabajan en forma conjunta mediante un conjunto de interfaces preparadas en Perl y se han diseñado un conjunto de herramientas que permiten el control de los datos que se entran y la ejecución de distintas opciones que facilitan el uso del programa. Se dispone de una interfaz gráfica que facilita sustancialmente la entrada de los datos y la inspección de los resultados. Luego de introducir los datos a través del programa Dia se llama al Simusol el cual ejecutará los distintos programas, Sceptre, Gnuplot y las interfaces, en forma automática sin necesidad de llamarlos por separado. La interfaz se encarga de revisar los datos e indican al usuario los posibles errores cometidos tanto en la entrada de datos como en el proceso de ejecución.

## 1.1 LOS SISTEMAS TERMICOS A ESTUDIAR

### 1.1.1.- PARÁMETROS CONCENTRADOS, TEMPERATURAS

El SIMUSOL es capaz de estudiar los llamados “sistemas a parámetros concentrados”, los explicaremos a continuación usando como ejemplo los sistemas térmicos.

El SIMUSOL es capaz de estudiar los llamados “sistemas a parámetros concentrados”, los que

En un sistema térmico la variable más importante es la temperatura. Un sistema concentrado es aquel que puede ser dividido en partes cada una de las cuales está determinada por una sola temperatura. Esto implica que el número total de temperaturas será finito.

#### **EJEMPLO 1.1**

*Un sistema físico está constituido por una masa de aire a temperatura constante, en la cual se coloca un tanque de agua que tiene una temperatura dada. El sistema queda definido en cada instante por dos temperaturas: la del aire y la del agua. Por tanto, es un sistema a parámetros concentrados.*

En muchos casos es posible transformar en forma aproximada un sistema que no es “a parámetros concentrados” en otro que sí lo es, pudiendo entonces realizar un cálculo aproximado del sistema utilizando el Simusol. Por ejemplo, en el caso del ejemplo 1.2 que sigue el colector se puede dividir en un conjunto de pedazos a lo largo del mismo y considerar que cada parte tiene una sola temperatura. El sistema se convierte en uno a parámetros concentrados y puede ser estudiado por el Simusol. La representación es aproximada y los resultados se aproximarán al resultado exacto cuando se aumente el número de partes que se utilice.

#### **EJEMPLO 1.2**

*Un sistema físico está constituido por un colector plano. Por un lado entra el agua fría y por el otro sale el agua caliente. El agua se va calentando a medida que recorre el colector. Por tanto, en cada instante existe una distribución continua de temperaturas desde la entrada a la salida. Una descripción exacta del equipo necesita conocer la distribución continua de temperaturas por lo que el sistema no es a parámetros concentrados.*

### 1.1.2.- LOS FLUJOS ENERGÉTICOS

Las temperaturas que describen un equipo pueden cambiar en función del tiempo como respuesta a la variación de los parámetros externos al mismo. El Simusol podrá calcular esa variación (funcionamiento transitorio). Estos procesos serán producidos por el intercambio de los flujos de calor entre las partes del equipo y el exterior, por lo que el Simusol deberá disponer de los datos necesarios para realizar el cálculo..

### 1.1.3.- LA DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA TERMICO

Una vez que el funcionamiento del equipo a estudiar se ha definido en la forma adecuada a través de sus temperaturas y flujos, como para someterse a un cálculo con Simusol, será necesario indicar expresamente las mismas al programa, lo que se hace a través de una descripción gráfica mediante el programa Dia. De esa forma estos datos se podrán pasar al Simusol para realizar los cálculos.

Con ese fin conviene comenzar dibujando un esquema del equipo a mano alzada, en el que se indican todas las variables a introducir, al que llamaremos “esquema térmico”.

En primer lugar, las temperaturas de cada parte del equipo se dibujan en el esquema y se les asigna un nombre identificador a cada una. Aquí utilizamos un redondel amarillo para indicar la temperatura. Este será el símbolo utilizado en el Dia. El nombre se colocará dentro del redondel. El nombre puede tener hasta 6 símbolos alfanuméricos. Por ejemplo puede usarse un nombre que empiece con una letra y es seguido por un número que cambia con cada temperatura, como ser A48 o simplemente 12. No usar la T como primer símbolo porque una versión del Simusol da error. El símbolo alfabético puede usarse en mayúscula o minúscula, entendiéndose que para el Simusol no se distingue esa diferencia. La única diferencia se establece en el caso de los nombres de archivos, donde se distingue entre ambos tipos de símbolos, lo que se estudiará en detalle más adelante.

En segundo lugar, entre cada pareja de temperaturas puede ocurrir un flujo de calor. El mismo se indicará con un dibujo distinto para cada tipo de flujo, como se indicará más adelante. En este dibujo se introduce un nombre identificador de hasta 4 símbolos que cumple las mismas condiciones que los nombres de temperatura. El nombre completo tiene una letra inicial determinada por el tipo de flujo, según se explicará más adelante. Este nombre se coloca como parte del dibujo.

### EJEMPLO 1.3

*Utilicemos como parte de esta ilustración el ejemplo1.1 , donde se dispone de un tanque de agua colocado en contacto con el aire de un local. Su esquema se muestra en la figura 1.1*

*Las dos partes del sistema son el tanque y el aire que lo rodea, cada una con su temperatura, a las que se llama 1 y 2. Es de observar que cada temperatura se indica en la forma usada por el Simusol, es decir, con un pequeño círculo amarillo. Entre las dos partes ocurre un flujo de*

calor que determina el funcionamiento. El mismo se indica con un dibujo al que se le da el nombre R21 y se indica con un par de segmentos su relación con las dos temperaturas.

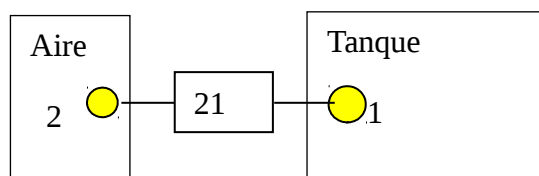


Fig. 1.1.- Esquema que describe el equipo del ejemplo 1.3

## 1.2 EL PROGRAMA DIA

El próximo paso consiste en la definición del esquema térmico en forma gráfica para que luego pueda ser pasado al programa Simusol. Con ese fin se utilizará el programa Dia:

El programa se llama por su nombre (Dia) y se mostrará en la pantalla como una ventana donde figuran algunos menús, botones y plantillas con los cuales se introducirá el esquema. Mediante el menú se abre la ventana donde se dibujará el diagrama.

El circuito térmico a definir en forma gráfica estará compuesto por :

1.- Nodos de temperatura.; uno por cada temperatura de interés.

Por cada temperatura que se introduzca en el modelo del sistema se debe colocar un nodo. El mismo se representa mediante un pequeño círculo amarillo dentro del cual se coloca su identificación. La figura 1.2 muestra un ejemplo de nodo de temperatura:

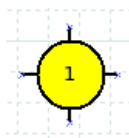


Fig. 1.2.- Muestra el elemento representativo de un nodo de temperatura con su nombre

El cero grado centígrado es una temperatura de referencia muy importante, que se incluye en la mayoría de las descripciones físicas, por lo cual en el Dia se lo representa con un símbolo especial constituido en un triángulo amarillo que se muestra en la figura 1.3. No se le asigna un nombre. Su papel dentro de nuestro esquema de trabajo se irá explicando en las secciones que siguen.

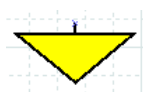


Fig. 1.3.- Muestra la representación grafica del cero grado centígrado.

## 2.- Elementos

Ellos introducen las partes del sistema térmico tales como los acumuladores que indican las masas capaces de guardar calor, resistencias que representan las formas básicas de transmisión de calor, fuentes de temperatura, flujos de calor, etc. El Dia permitirá elegir el tamaño del elemento que se introduce y se podrá colocar un nombre de hasta cuatro símbolos alfanuméricos que identifique al elemento. En la próxima sección se detallarán los mismos.

## 3.- Uniones

Los elementos tienen puntos de entrada y salida a través de los cuales intercambian energía con los otros elementos del circuito. Los puntos de distintos elementos deben ser unidos entre si para indicar los flujos de energía que definen el circuito.

## 4.- Cuadros

Cada elemento está definido térmicamente por un conjunto de parámetros cuyos valores numéricos deben entregarse al programa para la simulación. Ellos se introducen mediante Cuadros que se abren como ventanas donde se escriben los valores. También es necesario entregar varias instrucciones que configuran la simulación como ser, por ejemplo, el tiempo de cálculo.

Los elementos variarán con el tipo de diagrama a dibujar. Para cada uno el Dia dispone de una plantilla en la cual se pueden ver las representaciones gráficas de los elementos. En nuestro caso se usará la plantilla Simusol-Termico. Estas plantillas se seleccionan en la parte inferior de la ventana del Dia.

Las uniones se indican mediante segmentos o sucesiones de segmentos, que unen un punto de cada uno de los dos elementos que se unen. Las sucesiones de segmentos permiten cambiar de dirección con el fin de trazar diagramas de fácil lectura. Cada segmento tiene extremos indicados con puntos rojos. Con el ratón se toma el punto rojo y se mueve para colocarlo encima del punto del segmento. Cuando se coloca correctamente el punto rojo se transforma en verde. La zona intermedia de la ventana del Dia tiene botones que permiten realizar diferentes acciones, entre las cuales está la colocación de estos segmentos. Existen diferentes opciones.

Los cuadros se introducen a partir de la plantilla seleccionada. En el Simusol se usan cuadros que ya estaban disponibles en el Dia, razón por la cual los usados tienen algunas secciones y funciones que no se deben llenar en el caso del Simusol. Se dispone de una subventana donde se escriben los datos a entrar y de algunos botones. Uno de ellos permite finalizar con la entrada de datos y el otro permite elegir si los datos se van a mostrar en el diagrama o permanecerán como no visibles. Se usan cuadros con diferentes fines, por lo que cada uno debe ser identificado con un nombre que se escribe la primera vez que se usa el cuadro.

Existen varios botones adicionales para cumplir otras funciones. Por ejemplo, uno de ellos permite introducir textos explicativos como parte del diagrama.

Finalmente, en la parte superior de la ventana del Dia se dispone de un conjunto de menús donde se dispone de varias funciones necesarias para el funcionamiento del Dia. Por ejemplo, al iniciar el uso del Dia se debe abrir la ventana donde se dibuja el diagrama que se define.

Es conveniente que el usuario se entrene en el uso del Dia antes de comenzar a utilizarlo en relación con el Simusol. Con ese fin seleccionará la plantilla del Simusol-Termico y armará diferentes gráficos térmicos ensayando las posibilidades existentes.

A continuación se dan algunas referencias relativas al manejo del Dia:

- 1.- Para llamar al Día en el UBUNTU el símbolo de Día forma parte de la barra vertical “lanzadora” y basta apretarlo.
- 2.- Es conveniente ubicarse en una carpeta nueva para trabajar con el diagrama del Día debido que al ejecutarse en Día aparecerán en la carpeta unos cuantos archivos relacionados con la ejecución del Simusol. Por ejemplo, se dispondrá de todos los dibujos de los resultados es formato png o jpg. Otro archivos contendrán los resultados detallados en forma numérica.
- 3.- Se abre la ventana de manejo del Día y una ventana para trazar los diagramas nuevos. En las nuevas distribuciones las dos ventanas están integradas. Se introduce el dibujo y luego se guarda apretando las teclas *control-s*. Si no lo hace al cerrar el Día se perderá lo escrito. El diagrama es necesario guardarlo para que el Simusol use la nueva versión.
- 4.- Es necesario abrir una ventana de comandos para operar el Simusol. Esta ventana debe referirse específicamente a la carpeta donde se encuentra el diagrama de Día con el que se va a trabajar. Lo más sencillo es ubicarse en la carpeta del diagrama Día y una de las opciones que allí se tienen es abrir la ventana de comandos. Otra opción es usar el comando CD (Change directory) seguido de las especificaciones necesarias para llegar a la carpeta donde esta el diagrama del Día.  
Cuando se comienza a trabajar, la ventana de comandos y la carpeta donde está el diagrama del Día se encontrarán abiertas al mismo tiempo En la ventana de comandos se escribe el comando Simusol para ejecutar el programa. Se debe recordar que al apretar la tecla flecha para arriba aparecen en la ventana los comandos escritos con anterioridad. Esto es útil para no tener que escribir los comandos ya usados, en especial el del Simusol.
- 5.- Al ejecutar el Simusol aparecen varias líneas con diferente información y se termina mostrando los dibujos con los resultados( si la simulación fue exitosa). Si no termina bien se debe apretar return para terminar o a veces una q (de quit).
- 6.- El Día también se puede instalar en forma libre en el sistema operativo Windows. Allí se pueden preparar los diagramas necesarios para el uso del Simusol, pero este programa no corre en Windows por lo que es necesario pasar al Linux para usar el diagrama que haya preparado.

## 1.3 LA REPRESENTACIÓN DE LOS FLUJOS.

Hemos visto que los flujos térmicos se representan con símbolos que se eligen en una plantilla del Día, llamada Simusol-Térmico. A continuación introducimos los principales y nos entrenaremos en su uso.

Los flujos, además de su símbolo gráfico, necesitan un conjunto de datos que los definen a los efectos del cálculo. Se verá como se introducen esos datos en.

### 1.3.1.- LAS RESISTENCIAS CONVECTIVAS.

Una superficie que separa un cuerpo de un fluido es lamada por éste, lo que produce un intercambio calor entre ambos. Este flujo de calor es uno de los más habituales en un sistema térmico y se representa con un rectángulo de color celeste que recibe el nombre de resistencia convectiva. Existen dos opciones: aquellas en el que las entradas y salidas son horizontales y la otra en que las mismas son verticales. La figura 1.4 muestra uno de los dos casos. Este flujo se identifica con un nombre formado por no más de 4 símbolos alfanuméricos. Ya veremos que en el momento de introducir los valores de los parámetros necesarios para definir la resistencia, se debe anteponer una R al nombre elegido.

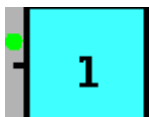


Fig. 1.4.- Muestra la representación gráfica de una resistencia convectiva.

### 1.3.2.- LAS RESISTENCIAS CONDUCTIVAS

Un cuerpo sólido se coloca en contacto con dos superficies a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ . Se produce un flujo de calor entre las dos superficies a través del cuerpo. Esta transmisión de calor recibe el nombre de flujo conductivo y se representará gráficamente mediante un rectángulo celeste como en el caso anterior, al que se agrega líneas dobles en los lados por los que entra y sale el flujo. Este elemento recibe el nombre de resistencia conductiva, la que se ilustra en la figura 1.5. A igual que en el caso anterior, el nombre identificador tendrá no más de cuatro símbolos y al dar los datos necesarios se antepondrá una  $R$  al mismo por ser una resistencia.



Fig. 1.5.- Muestra la representación gráfica de una resistencia conductiva.

### 1.3.3.- LAS RESISTENCIAS RADIATIVAS

Todo cuerpo con una temperatura dada emite radiación electromagnética. A temperaturas cercanas a la de la atmósfera terrestre la radiación emitida se encuentra en el infrarrojo lejano. A medida que la temperatura aumenta la radiación se acerca al infrarrojo cercano y cerca de los 700 C comienza a llegar al visible. A esa temperatura un cuerpo comienza a mostrar un aspecto rojizo. Estas radiaciones transportan energía y son capaces de atravesar el vacío y los gases por lo que se convierten en una forma adicional de transporte de energía entre dos cuerpos a la cual se conoce con el nombre de flujo radiativo. Esta transmisión se representa con el dibujo que se muestra en la figura 1.6. A igual que los dos casos anteriores el nombre que se le asignará un nombre.



Fig. 1.6.- Muestra la representación gráfica de una resistencia radiativa

#### EJEMPLO 1.4

*(Realizar sólo la parte gráfica) Dos paredes planas paralelas con un área de  $2\text{m}^2$  están en separadas por aire y se encuentran a las temperaturas de  $20\text{ C}$  y  $150\text{ C}$ . El aire está a  $50\text{ C}$ . Las dos paredes transmiten calor por convección hacia el aire con un coeficiente convectivo  $h$  igual a  $10\text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ . Entre ellas se intercambia calor radiativamente pudiéndolas considerar como cuerpos negros. Dibujar el circuito térmico que representa el modelo con el programa Día. Por ahora no introduzca los cuadros de datos*

### 1.4.4.-LAS ECUACIONES PARA CADA PÉRDIDA TÉRMICA.

Las pérdidas recién introducidas están definidas físicamente mediante ecuaciones donde se introducen los parámetros que cuantifican el fenómeno. Por ejemplo, la pérdida convectiva esta determinada por la siguiente ecuación:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_2 - T_1),$$

donde Q es el flujo de calor transmitido entre una superficie plana que tiene un área A y el fluido con temperaturas T1 y T2 respectivamente. El parámetro h es el coeficiente convectivo. Esta ecuación forma parte del Simusol cuando se usa con el código de fórmula V1, quien la utilizará para realizar el cálculo cuando la representación gráfica se utilice en el Dia. El valor de los parámetros se expresará en el sistema de unidades SI (sistema internacional de unidades).

Para que esto ocurra debe introducirse en el Dia los datos necesarios, en este caso los valores de h y A. La entrada de estos datos se realiza utilizando un nuevo ícono en el Dia, al que se le da el nombre de cuadro. Cuando se lo llama se abre un recuadro al que se lo bautiza con el nombre “DATOS” y donde se introducen los valores a dar a los distintos parámetros utilizando una nomenclatura especial. Por ejemplo, para una resistencia convectiva identificada como R21, se utiliza la siguiente expresión:

$$R21 = V1, A, h$$

Esta expresión indica que se darán los parámetros de la resistencia R21. El símbolo V1 nos dice que esta resistencia es de tipo convectivo ( la V nos hace recordar a una resistencia de tipo conVectivo y el 1 nos dice que se refiere a un intercambio en una superficie plana). A y h dan los valores de los dos parámetros típicos de esta resistencia.

Para el caso de las pérdidas conductivas la ecuación correspondiente a un cuerpo limitado por dos superficies planas y paralelas es :

$$Q = k \cdot A \cdot (T_2 - T_1) / e$$

Donde Q, A , T1 y T2 ya han sido descriptos en el caso anterior, e es el espesor de la pared plana por la cual pasa el flujo de calor y k es el coeficiente conductivo del material de la pared.

La entrada de los datos se lleva a cabo utilizando la siguiente expresión:

$$R22 = D1, A, e, k$$

En la cual R22 es el nombre de la resistencia, la letra D identifica la resistencia como conductiva (la D corresponde al nombre conDuctivo) y el 1 nos dice que es un cuerpo conductivo plano.

Para el caso de las pérdidas radiativas, la ecuación correspondiente al intercambio radiativo entre dos superficies planas, una de las cuales es negra y la otra tiene una emisividad ε es:

$$Q = 6,87 \cdot 10^{-7} \cdot \epsilon \cdot f \cdot A \cdot [(T_2 + 273,15)^4 - (T_1 + 273,15)^4]$$

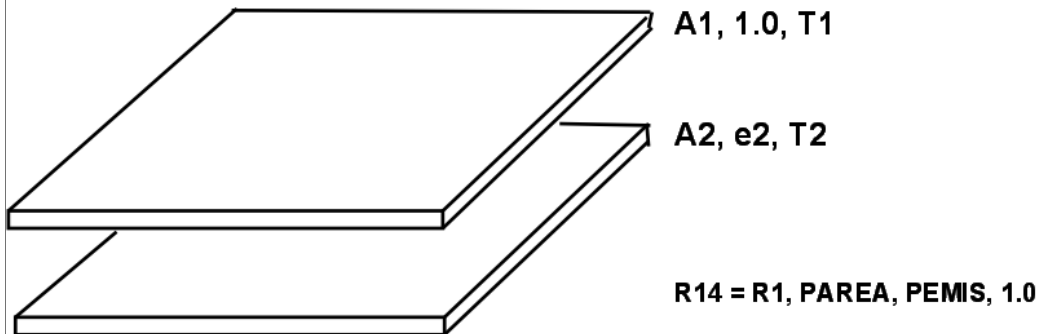
Donde f es el factor de forma que depende de la posición relativa de las superficies planas paralelas y A es el área de la superficie plana. En este caso, T1 y T2 se siguen expresando en grados centígrados. Para entrar los datos se usa la expresión:

$$R23 = R1, A, \epsilon, f$$

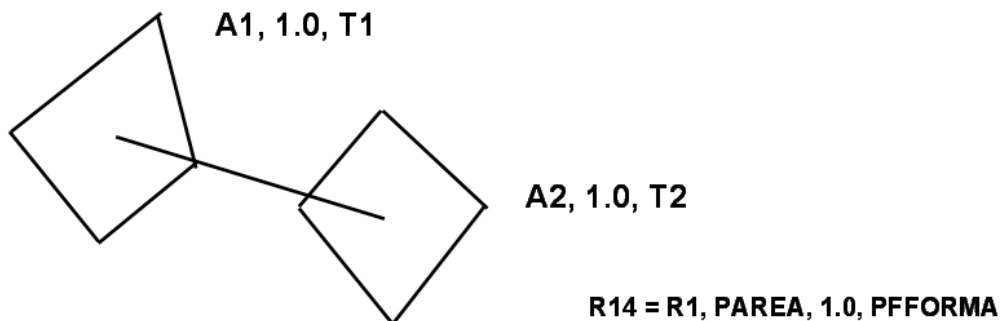
donde se dan los parámetros de la resistencia R23. La R indica que es del tipo radiativo (donde la R corresponde al nombre Radiativo), el 1 indica que el intercambio ocurre entre superficies planas y a,  $\epsilon$  y f son los tres parámetros ya nombrados. La expresión anterior se modifica si se usan otras geometrías y condiciones especiales. En el Simusol se han considerado tipos de expresión que se identifican con las designaciones R1 a R4. Ellas están descriptas en las figuras 1.7.a y 1.7.b

#### FORMULA R1 .- DOS SUPERFICIES PLANAS PARALELAS GRANDES

Una superficie negra, la otra gris



#### FORMULA R1: DOS SUPERFICIES CUALESQUIERA NEGRAS



#### FORMULA R1.- OBJETO CHICO CONVEXO DENTRO DE CAVIDAD GRANDE

Area y emisividad del objeto chico

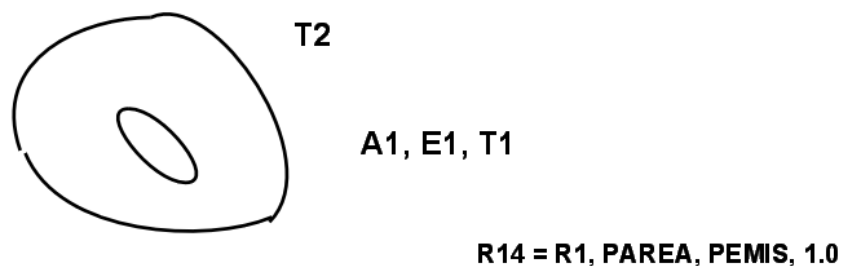


Fig. 1.7.a.- Muestra 3 casos de disposición geométrica y tipos de datos de un intercambio radiativo que se pueden usar en el Simusol, estando reconocidas como tipo R1.

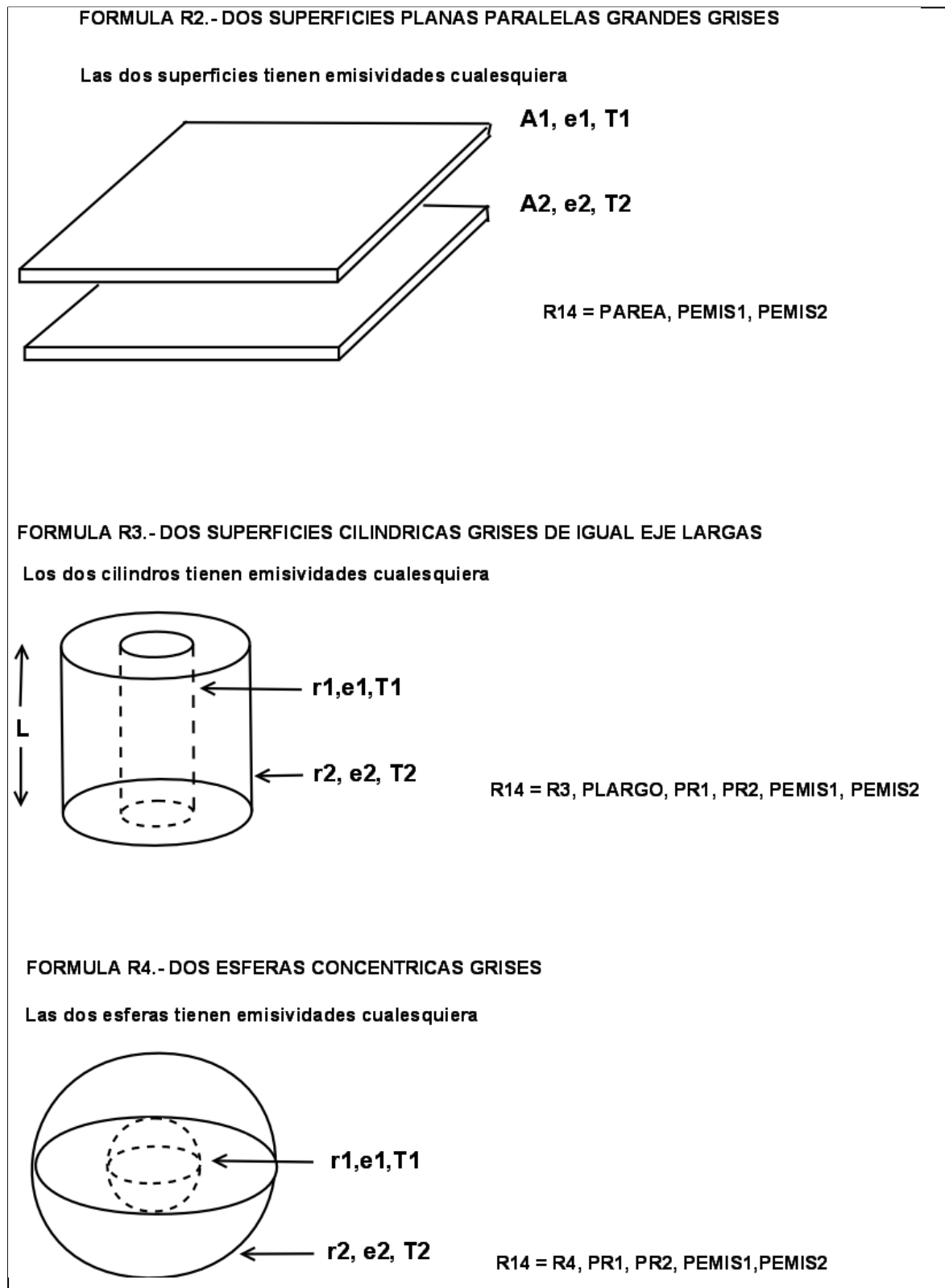


Fig. 1.7.b.- Muestra otros 3 casos de disposición geométrica y tipos de datos de un intercambio radiativo que se pueden usar en el Simusol, estando reconocidas como R2 a R4

#### EJEMPLO 1.5

Termine de preparar el diagrama del ejemplo 1.4 dibujando el circuito y preparando los cuadros necesarios (datos, tiempo, iniciales, parámetros y eventualmente controles)

### 1.4 LAS MASAS TERMICAS

Todos los cuerpos que intervienen en la definición del fenómeno térmico tienen una masa en la cual se puede almacenar energía mediante un cambio en su temperatura. La capacidad térmica del cuerpo se da mediante su calor específico  $c_p$ . Dado que estas masa intervienen en el intercambio térmico proveyendo una acumulación sensible, deben introducirse en la descripción del mismo mediante el programa Dia. La figura 1.8 muestra la representación gráfica de una masa acumuladora, que puede ser sólida, líquida o gaseosa. La misma será identificada con un nombre. Cuando se use para describir los datos necesarios al nombre se agregará una C antepuesta al resto del nombre. La letra C es utilizada porque en el circuito eléctrico equivalente la masa de acumulación está representada por una capacidad eléctrica.



Fig.- 1.8.- Muestra la representación gráfica de una masa de acumulación

La cantidad de energía acumulada en una masa se calcula usando una temperatura de referencia, que en el caso del Simusol será el 0 grado centígrado. Por tal razón a la representación gráfica, que es parecida a un recipiente y tiene color verde, se le agrega por debajo un triángulo amarillo. El mismo representa, según ya lo hemos visto, el 0 grado.

La cantidad de energía acumulada en la masa está dada por la siguiente fórmula:

$$Q = c_p * M * (T_1 - 0)$$

Donde Q es el calor acumulado referido al 0° C, T1 la temperatura de la masa, M su masa y  $c_p$  su calor específico. En la fórmula se ha agregado un cero para remarcar que el calor calculado está referido al cero grado centígrado.

Como en los casos ya definidos, los parámetros que definen el flujo deben ser dados mediante un cuadro titulado con la palabra DATOS. La expresión es:

$$C25 = C1, c_p, M$$

Donde se identifican los datos con el nombre de la masa, que es 25. la C indica que es una masa. La expresión C1 indica cual es la fórmula utilizada. Finalmente se colocan los valores de los dos parámetros  $c_p$  y M., variables físicas que identifican el acumulador.

#### EJEMPLO 1.6

En el diagrama del ejemplo 1.5 coloque dos masas de agua de 200 kg, cada una en contacto con una de las dos paredes.

## 1.5 FUENTES DE TEMPERATURAS Y FUENTES DE CALOR

Durante una simulación es muchas veces necesario introducir una temperatura como dato, ya sea constante o variable en el tiempo. Con ese fin se dispone de un ícono en el Día que representa una fuente de temperatura. La figura 1.9 muestra su representación gráfica



Fig. 1.9 .- Muestra la representación gráfica de una fuente de temperatura.

La identificación completa de este elemento debe comenzar con una E (ya que en el símil eléctrico las fuentes son fuentes de voltaje). El valor de la fuente debe introducirse en el cuadro de datos como se indica a continuación:

$$E26 = 45$$

En este caso la temperatura es constante e igual a 45 grados centígrados. Es posible entrar funciones del tiempo, ya sea mediante una función analítica o con una tabla. Para el caso analítico el siguiente es un ejemplo:

$$E26 = 50 + 20.\text{Sin}(2*3.1415*\text{TIEMPO}/7200)$$

La introducción de tablas en estas expresiones la aprenderemos mas adelante.

### EJEMPLO 1.7

*Un tanque cúbico con un lado de 1.2 m tiene agua a una temperatura inicial de 80 C. Se encuentra en un local cuyo aire, paredes y piso están a una temperatura de 20 C. Preparar con el Día el circuito térmico del sistema teniendo en cuenta la pérdida convectiva del tanque al aire ( h=8) y su pérdida radiativa hacia las paredes que rodean completamente al tanque. Se supondrá que las paredes y tanque se comportan como un cuerpo negro..*

El entrada o salida de flujos de calor externos es otro de los procesos térmicos habituales. En el Simusol se dispone de iconos los cuales pueden ser usados en una simulación. Se tienen disponibles dos procesos de transferencia de uso común.

Uno de ellos es la entrega directa al proceso de un flujo de calor. Como ejemplo se puede considerar un calentador eléctrico que aumenta la temperatura de un depósito de agua. Otro caso común en sistemas solares es la incidencia de radiación solar en una superficie del equipo que se simula. La figura 1.10 muestra la representación gráfica de un flujo de calor. El nombre que se usa al entrar datos debe comenzar obligatoriamente con una J para que el Simusol lo reconozca como tal. El uso de la J proviene de los flujos eléctricos en el circuito eléctrico equivalente.



Fig. 1.10.- Muestra la representación gráfica de un flujo de calor.

En el Simusol los flujos de calor están referidos a un área A. Esto se ha organizado así porque en las simulaciones solares es muy común el flujo de energía solar en un área dada. Si el flujo no está referido a un área, al valor de A se lo indica como 1. Los datos necesarios que se deben cargar en el cuadro de DATOS se expresan en la siguiente forma:

$$J29 = JQ, A, q$$

Donde A es el área de referencia y q el flujo de calor por unidad de área. El hecho de que el flujo sea de calor se identifica con las letras JQ ( Q de calor ).

El otro proceso está relacionado con un flujo de masa que entra o sale de un acumulador. Este flujo se mide en kg/s y se expresará como “fM”. Este flujo de energía está relacionado con la temperatura T de la masa de la cual sale. Si el flujo de una masa fM de un fluido con un calor específico cp y proviene de un nodo que se encuentra a una temperatura T, el flujo de calor valdrá:

$$Q = cp \cdot fM \cdot T$$

Se le asignará un nombre, al cual se le agregará una J cuando se den los parámetros que lo caracterizan en un cuadro de DATOS. La expresión será:

$$J30 = JM, cp, fM$$

Como se aprecia, el hecho que el flujo sea másico se identifica con la notación JM ( M de masa )

### EJEMPLO 1.8

*Un colector solar está formado por un tanque con un área de 2 m<sup>2</sup> y un espesor de 2 cm expuesto al aire a través de un vidrio. Se supone que el tanque tiene una temperatura uniforme y pierde calor hacia el exterior a través del aire con un coeficiente convectivo igual a 5 W/m<sup>2</sup>.C. una bomba mueve el agua del colector a otro tanque de 150 litros a temperatura uniforme. El agua retorna al colector después de mezclarse con el agua del tanque. El colector recibe a través del vidrio una radiación constante igual a 700 W/m<sup>2</sup> durante 8 horas.. Se supone que la temperatura del aire es constante e igual a 20 C y que la temperatura inicial de ambos tanques es igual a 15 C. Preparar con el Dia el circuito térmico de este sistema.*

## 1.6 NOMBRES DE TEMPERATURAS Y FLUJOS.

En el Simusol se dispone de las temperaturas de cada nodo en cada instante del cálculo, ya sea para conocer esos valores a fines de analizar los resultados o como variables que formarán parte de ecuaciones a utilizar en el cálculo.

Estas variables se designan con un nombre que empieza con “Temp” seguido del nombre del nodo que interesa. Por ej., si se quiere la temperatura del nodo 25, la variable correspondiente se llamará Temp25. Se pueden usar tanto minúsculas como mayúsculas.

También se dispone de los valores de los flujos de calor en los elementos. En ese caso se usa la Expresión “Flujo” seguida del nombre del elemento. Por ejemplo, Si el elemento es R18, el nombre a usar es FlujoR18.

Existe una nomenclatura alternativa que proviene de la original utilizada por el Sceptre, que indica el flujo sobre un elemento o la diferencia entre las temperaturas de los dos nodos a los que está conectado el elemento. Para el flujo se coloca delante del nombre una I. Por ejemplo, una resistencia R24 es atravesada por un flujo IR24. Para la diferencia de temperaturas entre los extremos de un elemento se usa la letra V. Por ejemplo, en el caso de la resistencia R24, se usa VR24. La I y la V provienen de la nomenclatura eléctrica original del Sceptre (corriente I y voltaje V). Esto implica que esta nomenclatura no da naturalmente la temperatura de un nodo sino diferencias. No obstante, si al nodo está conectado una masa, el otro extremo de la masa siempre está conectado al cero centígrado, por lo que en ese caso si se obtiene la temperatura del nodo.

### 1.7 EL CALCULO CON EL SIMUSOL

Una vez que se arma gráficamente el diagrama que representa el fenómeno térmico será necesario recurrir al Simusol para realizar el cálculo final. No obstante, previamente es necesario introducir un conjunto de datos complementarios, lo que se hace mediante diferentes cuadros que se detallan a continuación.

Todo sistema térmico necesita que se definan valores iniciales dealgunas de las variables del mismo. Ellas son las temperaturas iniciales de los nodos a los cuales están conectadas las masas de acumulación. Dichas masas tendrán temperaturas iniciales que se dan a través de un cuadro al que llamaremos con el nombre de INICIALES. Los valores que se deben dar son las temperaturas de los nodos a los cuales están conectadas las masas. La figura 1.11 muestra un ejemplo de un cuadro de este tipo.

Iniciales	Iniciales
Temp 10 = 50	VC25 = 40

Fig. 1.11.- Muestra dos cuadro INICIALES con definiciones de valores iniciales de temperatura de un nodo.

En elprimer cuadro se asigna directamente el valor del nodo 10. En el segundo cuadro de la figura 4.8 se supone que al nodo 10 se ha conectado un acumulador (C25). La tensión

entre los extremos del acumulador se indica con un V, es decir VC25. Por tanto, se está definiendo que el valor de temperatura del nodo es 40.

Otro parámetro importante es el tiempo de cálculo, el cual se da en un cuadro separado al que se llama TIEMPO. El valor puede estar expresado en segundos, minutos, horas o dias. Por ejemplo, se podrá indicar 7200 segundos, 120 minutos o 2 horas. El número deberá ser seguido por el nombre de la unidad de tiempo utilizada. La figura 1.12 muestra un cuadro “tiempo”

Tiempo
3 horas

Figura 1.12.- Muestra el cuadro tiempo.

Finalmente, el Simusol, una vez que termina el cálculo, puede mostrar gráficos de los resultados que interesan. Para ello se debe definir un cuadro “resultados” donde se indican las variables que se quieren dibujar.

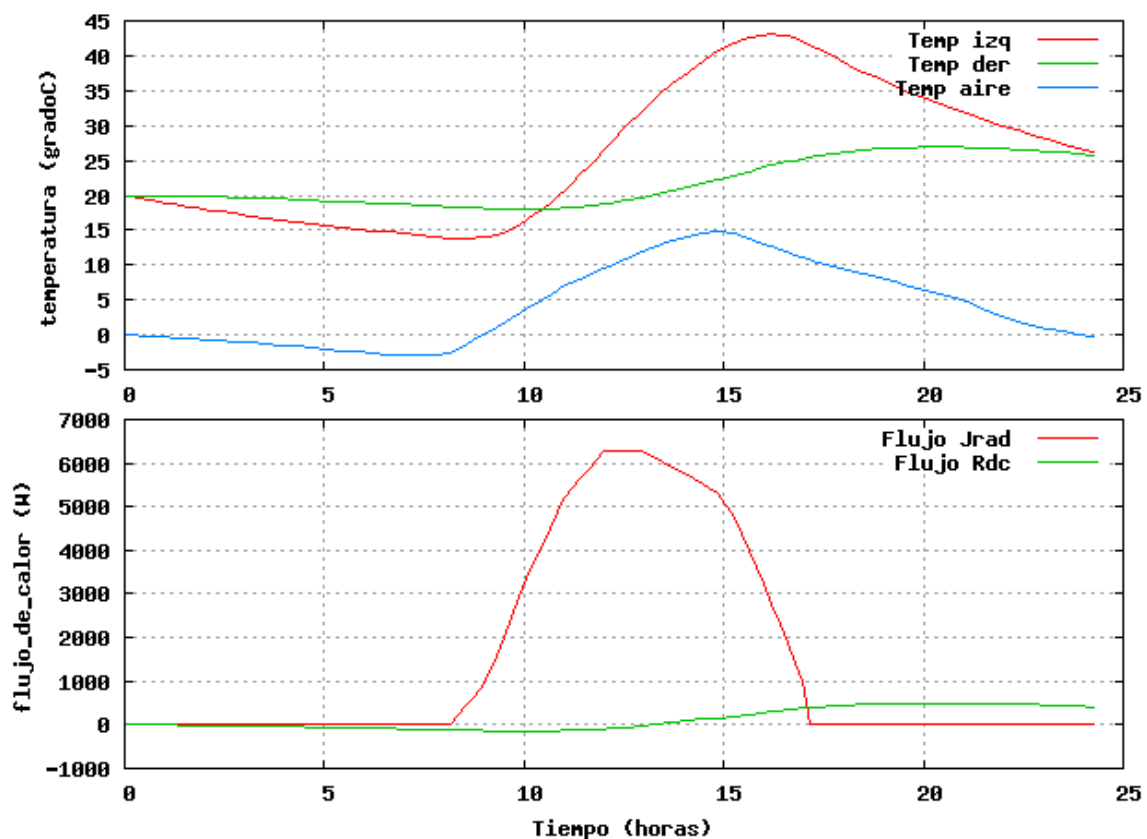
Resultados
Temp 10 Flujo R25

Fig. 1.13.- Muestra el cuadro “resultados”.

Por defecto, el Simusol agrupa los distintos tipos de variables, por ej. todas las variables Temp., y las muestra en un solo gráfico. Si hay mas de un gráfico los mostrará en secuencia a medida que se aprieta Return después de mostrar un gráfico dado.

Es posible solicitar gráficos más elaborados, pero ello será discutido más adelante. Por ejemplo, se pueden colocar datos experimentales que se entregan en un archivo, o poner nombres especiales en los ejes, etc.

Los dibujos son de buena calidad. La figura 4.11 muestra un ejemplo en el que se aprecia la variación de varias temperaturas y un flujo.



#### 1.14.- Gráfico de los valores calculados para dos temperaturas como función del tiempo.

Una vez que se han completado el diagrama y todos los cuadros con los datos necesarios, se puede proceder al cálculo. A esos efectos se deberá disponer de dos ventanas abiertas:

- 1) Una es la del Día que contiene el diagrama en el que se trabajó. No debe olvidarse de guardar el diagrama en una carpeta de su directorio y asignarle un nombre, por ej., diagrama1.dia. o un nombre más específico. Esto es necesario para interpretar resultados y es imprescindible para corregir errores.
- 2) Luego se debe abrir una ventana terminal y en la misma cambiar de directorio hasta ubicarse en la carpeta que contiene el diagrama (para eso se usa el comando CD, es decir, *change directory*). Allí se ejecutarán los comandos para realizar el cálculo y el simusol responderá dando indicaciones diversas sobre el cálculo realizado.

Para llevar a cabo la simulación se escribirá el siguiente comando en la ventana terminal:

```
simusol diagrama1.dia
```

Si la carpeta tiene un solo diagrama basta escribir simplemente:

```
simusol
```

Si tiene más de un diagrama y escribe solo simusol, el programa lista los diagramas disponibles y se puede elegir el que se quiere ejecutar.

Existe la posibilidad de solicitar otras tareas con este comando, las que se verán más adelante.

Al comenzar el cálculo el Simusol escribe información diversa sobre el mismo a medida que se lleva a cabo.

Ante todo revisará el diagrama y en caso de encontrar errores, pedirá que se los corrija. El Simusol puede revisar una cantidad bastante extensa de posibles errores. Cuando el mismo se refiere a algún problema con el diagrama, por ej. un nodo no conectado, indicará la posición en el que ocurre utilizando las coordenadas que aparecen en la ventana del diagrama. Luego comenzará el cálculo. Eventualmente puede indicar algún error de cálculo que impide terminar el mismo.

Terminado el cálculo se muestra una tabla con un resumen sobre los resultados referidos a las variables para las cuales se solicitó resultados.

Finalmente, mostrará los gráficos de las variables de interés.

#### **EJEMPLO 1.9**

*Un tanque de forma prismática tiene un área en su cara mayor de 4 m<sup>2</sup> y un espesor normal a ésta de 0.20 m. Sobre una de las caras mayores recibe una radiación solar de 600 W/m<sup>2</sup> durante 8 horas. El tanque está rodeado de aire a una temperatura constante de 20 C. Determinar la curva de ascenso de temperatura del tanque durante esas 8 horas. El coeficiente convectivo de pérdidas de las paredes vale 10 W/m<sup>2</sup>C . No se tendrá en cuenta la pérdida por el piso. Se preparará el gráfico en el Dia incluyendo todos los datos necesarios para el cálculo. Se realizará el cálculo con el Simusol.*

## CAPITULO 2 .- CONCEPTOS AVANZADOS

En el capítulo anterior hemos explicado el funcionamiento básico del Simusol. Este programa dispone de muchas otras propiedades que enriquecen en mucho sus posibilidades de uso convirtiéndolo en un programa poderoso para el estudio de sistemas físicos. A continuación se irán introduciendo las mismas.

### 2.1.- TABLAS Y ARCHIVOS

Tabla1
factores=3600,1
8,0
9,100
10,300
11,600
12,800
13,900
14,900
15,800
16,600
17,300
18,100
19,0
24,0

Fig. 2.1.- Muestra una Tabla de radiación solar en función del tiempo

En algunas simulaciones será necesario entregar datos en forma de tablas. Por ej., los valores de radiación solar incidentes en un modelo se podrán dar en una tabla como función del tiempo. Existen dos formas alternativas de hacer esto, que explicaremos a continuación.

Es posible introducir tablas en el diagrama que describe el sistema en forma manual usando un cuadro al que se le pone el nombre de tabla seguida de una identificación, por ej., tabla1. La figura 2.1 muestra un ejemplo de tabla de radiación solar

En este caso la radiación es función del tiempo por lo que se entran dos columnas que contienen el tiempo y el valor de la radiación. Los valores en cada línea se separan con una coma, un blanco o un tabulador. Los datos de tiempo deberán llegar al Sceptre en segundos, pero aquí se puede colocar al comenzar un factor que multiplica toda la columna. Si el factor es 3600 los tiempos se expresan en horas. La radiación se da en vatios/m<sup>2</sup> y por eso se usa un factor 1.

El Sceptre supone que la función a introducir está dada por puntos. Cuando se usa en la simulación, los valores intermedios que se necesiten los calculará mediante una interpolación lineal entre los dos valores próximos y por extrapolación lineal entre los dos puntos anteriores en los extremos.

También se requiere que la primera columna contenga valores crecientes, lo que es controlado por el Simusol.

Es de observar que si la tabla contiene valores constantes en una zona extensa alcanza con poner el primer y el último valor. El programa interpolará linealmente para obtener los valores intermedios que se puedan necesitar.

Existen otros posibles agregados que son de utilidad en algunos casos y se encuentran en el manual.

Uno de ellos es la posibilidad de repetir una o más veces los datos inicialmente entrados. Esto es útil, por ejemplo, en el caso de que se quiera correr datos de varios días siendo iguales todos los días. Se entra un solo día y luego se pide la repetición. Para eso se escribe

$$\text{rep} = 3$$

y los datos ya entrados se repiten 3 veces cuando son enviados al Sceptre para el cálculo..

### **EJEMPLO 2.1**

*El muro colector acumulador de un local es de hormigón ( $k=2.5$ ,  $\rho=2400$ ) con un espesor de 0.3 m y un área de 9 m<sup>2</sup>. Recibe una radiación solar dada por una tabla. La temperatura ambiente varía con el tiempo según otra tabla. Modelizando el muro mediante 2 puntos llevar a cabo la simulación del funcionamiento del muro durante 24 horas. La pérdida del muro al exterior está dada por  $h=5$  y la de la pared al local por  $h=8$ . El local tiene una temperatura constante de 20 C.*

Otra alternativa para entrar datos es copiarlos de un archivo ya preparado. A esos efectos se utilizan comandos escritos en un cuadro al que se le da el nombre "tablas\_archivos" como se muestra en la figura 2.2.

tablas_archivos
archivo TEMP = temperaturas.dat columnas tabla1 = TEMP, 2:4 factores tabla1 = 3600,1 rep =3

Fig. 2.2.- Muestra un cuadro del tipo Tabla\_archivo.

Supongamos que los archivos contienen varios datos organizados en columnas, de las cuales queremos introducir los que están en las columnas 2 y 4. En el primer comando se indica que se va a tomar datos del archivo temperaturas.dat y se le da el nombre simbólico TEMP a efectos de reconocerlo en el cuadro. Luego se indica que las columnas a introducir en la tabla1 serán la 2 y la 4. Si se desea colocar otros posibles datos se lo hace a continuación. Aquí le decimos que queremos factores de valor 3600 y 1. También indicamos que se quieren repetir los datos 3 veces. Se pueden definir mas de una tabla en el mismo cuadro

El archivo del cual se toman los datos debe ser un archivo de tipo texto y tener separados los números por blancos o por comas en cada línea. Es muy común tener datos en tablas de Excel. En ese caso se debe abrir la tabla Excel y pedir que se guarde en esa forma. Una de las opciones es la de separar los números con un separador, lo cual es útil a estos efectos.

## 2.2.- LAS VARIABLES

En el Simusol se dispone de los valores de diferentes variables relacionadas con los diagramas, lo que permite profundizar el estudio de los mismos.

Ante todo se puede disponer del flujo que pasa por cualquier elemento y de la diferencia de temperatura entre los dos nodos de un elemento, anteponiendo al nombre del elemento las letras I o V. Por ejemplo, el flujo a través de la resistencia R15 es IR15 y la diferencia de temperatura entre sus nodos es VR15. Esta notación tiene su origen en el caso de circuitos eléctricos donde I y V representan a la corriente eléctrica y la diferencia de voltaje.

Para disponer de la temperatura de un nodo se necesita tener un elemento conectado al nodo cero. Si la resistencia R24 estuviera colocada entre el nodo T10 y el cero, la diferencia VR24 dará la temperatura del nodo T10.

En el Simusol se ha agregado otra forma de disponer de los valores de estas variables. Consiste en introducir dos nombres, TEMP y FLUJO. La expresión TEMP T10 dará directamente el valor de temperatura en T10. La expresión FLUJO R24 dará el flujo que atraviesa a R24. TEMP y FLUJO pueden ser consideradas como funciones capaces de dar los valores de esas variables.

Una variable muy importante en el Simusol es el tiempo. Se puede disponer del mismo utilizando el nombre TIEMPO, o si se quiere, TIME.

## 2.3.-LOS PARÁMETROS, DERIVADAS

En Simusol es posible utilizar variables llamadas parámetros. Se los nombran en la forma normal, reconociéndolos porque empiezan con una p o P. Por ejemplo, Pa es un parámetro.

Los parámetros se usan por varias razones:

- 1) simplifican la modificación de datos. Si un dato es utilizado en varios lados, se lo indica mediante un parámetro que se pone en todos los lugares. Cambiando el valor del parámetro se cambian los valores de todos los lugares a la vez.

- 2) Su uso simplifica la descripción de una expresión algebraica o de una función, como se verá más adelante.
- 3) Se pueden definir como parámetros alguna variable que no coincida con una variable de la simulación, por ejemplo, la potencia entregada en una parte del circuito. En ese caso se define la variable de interés como dato y la misma se puede mostrar al final del cálculo en una gráfica.
- 4) Se puede ordenar la definición de los datos más importantes dándoles valores simultáneamente en un solo cuadro.

Los parámetros se definen en un cuadro con el nombre de “parámetros”, como se aprecia en la figura 2.3.

parámetros	
Pa=21.5	Iniciales
Pb=45	
Pal = 1,5,10	Pener=0
DPener = VR12*IR1	

Fig. 2.3.- Muestra el cuadro de definición de parámetros y el de valores iniciales

En la figura 2.3 se observa un detalle: a uno de los parámetros se le asignó varios valores simultáneamente. Con esto se logra que el cálculo se lleve a cabo 3 veces con los distintos valores señalados. Esto es muy útil cuando la simulación se está poniendo a punto.

Otro detalle es que en el cuadro “ resultados “ a cada parámetro se le pueden agregar 3 datos:

- 1) nombre para identificarlo en los gráficos,
- 2) magnitud que representa,
- 3) unidad.

Si esto se hace, el Simusol agrupará en un solo gráfico todas las variables que tengan la misma magnitud y unidad (se debe tener cuidado en que digan exactamente lo mismo). Esto no es necesario para las variables temperatura y flujo, el Simusol tiene la información para agruparlos.

Otro aspecto de interés es la definición de la derivada de un parámetro, en el caso de la figura 2.3 el parámetro Pener. A la derecha se ha colocado la potencia disipada en la resistencia R12. Al poner esta sentencia el programa Simusol calculará la integral de la expresión a la derecha y la pondrá en Pener, de manera que esta nos dará la energía total disipada en la resistencia como función del tiempo. Será necesario dar el valor inicial de DPener, que debe ser igual a 0. Ello se consigue con el cuadro iniciales como se indica en la figura 2.3.

## 2.4.- LAS FUNCIONES

El Sceptre ha sido programado utilizando el lenguaje Fortran. Este lenguaje dispone directamente de un conjunto interesante de funciones matemáticas. El Simusol se ha preparado para que haga uso de esas funciones en forma directa.

Por ejemplo, la función SIN(tiempo) entregará valores del seno de la variable tiempo.

En el Fortran se pueden definir expresiones algebraicas utilizando símbolos para las operaciones algebraicas comunes ( + , - , \* , / , \*\* , ( ) ). Esto también se ha extendido al Simusol.

Por ejemplo, las expresiones:

TEMP T10 \* 7 + TEMP T27 / 15 - TEMP T11\*\*2 + 6\*SIN(TEMP T10),

Pener = Temp R24 \* Flujo R24,

serán entendidas y ejecutadas por el Simusol.

En el Simusol también se pueden definir funciones, a cada una de las cuales se asigna un nombre. Ello se lleva a cabo utilizando un cuadro denominado "funciones". La única condición a cumplir es que el nombre de la función empiece con la letra Q. Las funciones pueden depender de uno o mas argumentos, El nombre utilizado para cada argumento no tiene limitaciones en cuanto al tipo de símbolo alfanumérico usado, pero debe tener más de unoy no más de 5. La figura 2.4 muestra un ejemplo.

FUNCIONES
$QWS(PS) = 0.622*PS/(100000 - PS)$ $QPS(TT) = 610.7*10^{**}(7.5*TT/(TT+273))$

Fig. 2.4.- Muestra un cuadro de definición de funciones.

El ejemplo corresponde al cálculo de la humedad absoluta de saturación utilizando la función de la presión de saturación como función de la temperatura. QWS nos da la humedad absoluta de saturación como función de la presión de saturación PS. QPS da la presión de saturación como función de la temperatura TT.

Si bien el nombre de los argumentos no tiene limitaciones, cuando la función es usada en los distintos cuadros del Simusol, los argumentos a usar deben ser variables del Simusol

## **EJEMPLO 2.2**

*Un tanque con 100 kg de agua está calentado por una fuente térmica. Se utilizará un controlador para mantener cuasi constante la temperatura del agua una vez que la misma llegue a 50 C. Simular el controlador con el Simusol. Se supone que el tanque está en un ambiente de aire a 0 C y que el tanque pierde calor a través de sus paredes con una constante convectiva de 10 w/m2.C. El área de contacto del tanque con el aire es de 1 m2. Para resolver este problema se utilizará la función de Fortran llamada Dsign(a,b), donde a es un número a elegir y b un dato. La función pasa el signo de la variable b a la variable a.*

## 2.5.-INSERCIÓN DE FIGURAS DEL DIA EN EL WORD.

Si usted prepara trabajos en el Word, se pueden insertar diagramas dibujados en el Dia, que deben ser “exportados” para ser usados fuera del Dia. Para eso siga los siguientes pasos.

- 1) Abra la ventana del Día y cargue el diagrama a copiar. Se va a insertar todo lo que está escrito en la ventana del Día.

- 2) En el menú del Día apriete:

*Archivos -> exportar.*

Se abre una ventana para elegir el formato del archivo exportado(elija PNG(con antialiasing), además del nombre y la carpeta donde se guardará.

Apretar *guardar*

En ese momento se abre otra ventanita para elegir el tamaño en pixels del gráfico. Basta elegir uno de los dos, el otro se acomoda para respetar la forma. Un ancho de 700 pixels suele dar buena definición

El Word acepta bien los gráficos tipo png y los dibuja con buena definición si se ha elegido bien el número de pixels. El Día es capaz de exportar en otros formatos, pero los png son los que mejor acepta el Word. El gráfico se exporta con todos sus colores.

## 2.6.-COMENTARIOS Y CONTROLES

El cuadro COMENTARIOS se abre en la misma forma que los ya vistos y se le coloca ese nombre. Todo lo que se escriba en él no será utilizado por el Simusol, solo servirá para brindar información al usuario. Habitualmente se colocan comentarios sobre el diagrama en el que se está trabajando.

También es posible mezclar comentarios en otros cuadros. En ese caso el comentario debe ir precedido por el signo “;” para que el Simusol entienda que es un comentario que se desea quede registrado.

Otro cuadro utilizado es el llamado CONTROLES. Cuando se lo define se le debe dar ese nombre. Los comandos que allí se introducen definen distintos aspectos del funcionamiento del Sceptre. A continuación se introducen los más habituales.

El Sceptre puede usar distintos métodos numéricos para resolver los sistemas de ecuaciones que le presenta una simulación. Los mas habituales son los métodos TRAP, IMPLICIT y RUK: Este último usa el método Runge-Kuta.

El método implícit es necesario utilizarlo en algunos casos. Sin embargo, por defecto el Sceptre trabaja con el método TRAP debido a que el Implicit no es posible utilizarlo sino se tienen condensadores en el circuito o inductivos. La forma del comando es:

INTEGRATION ROUTINE = IMPLICIT

o :

INTEGRATION ROUTINE = TRAP

También se puede indicar en este cuadro el tiempo de arranque o de parada del cálculo. Para ello se debe poner:

START TIME = 500

STOP TIME = 2000

El Sceptre va avanzando en pasos de tiempo a lo largo del cálculo que realiza. Esos pasos son calculados por el propio programa asegurándose que los errores que se pueden cometer estén acotados. A través de un control es posible seleccionar el mínimo o el máximo valor que ese intervalo tiene con los siguientes controles:

MINIMUM STEP SIZE =  $1\text{E-}15$

MAXIMUM STEP SIZE = 100

# CAPITULO 3.- OTROS SISTEMAS FISICOS

## 3.1 INTRODUCCIÓN

El Simusol ha sido desarrollado utilizando la analogía existente entre los fenómenos térmicos y los eléctricos, por la cual un programa como el Sceptre, originalmente preparado para el estudio de sistemas eléctricos, ha podido ser usado en la simulación de sistemas térmicos.

Esta analogía tiene su origen en propiedades más profundas de los sistemas físicos que permite extender esta analogía particular a otros sistemas físicos, como ser los mecánicos, los de movimiento de aire o agua, los de aire húmedo, etc. En los últimos 20 años se ha desarrollado una teoría que da bases físicas a esta analogía, la que recibe el nombre de “bond graph theory”. Ella tiene una aplicación creciente, especialmente en el campo de la ingeniería.

Esta generalización de las analogías entre distintos sistemas físicos permite que el Simusol pueda ser aplicado a la simulación de sistemas físicos muy diversos, lo que se explicará a continuación. Incluso, el Simusol puede ser aplicado a sistemas en los que se combinan campos diversos de la física. Por ejemplo, un panel fotovoltaico, que combina fenómenos eléctricos y térmicos puede ser simulado con el Simusol. Lo mismo puede decirse de un motor Otto o uno Stirling, en los que se combinan aspectos mecánicos y térmicos, o de un secadero solar donde se combinan los fenómenos térmicos con los de evaporación. En estos casos se necesitan dos representaciones gráficas, una para cada tipo de sistema físico. Los dos diagramas se simulan en forma simultánea y las variables de ambos diagramas interaccionan entre si.

Las bases físicas en las que se basa la analogía radican en el hecho de que estos sistemas tienen una estructura similar desde el punto de vista energético. En ellos se pueden definir variables de dos tipos distintos, las llamadas variables tipo “esfuerzo” y las que reciben el nombre de variables tipo “flujo”. Los intercambios energéticos pueden ser expresados como productos de una variable de un tipo por una del otro tipo.

La figura 3.1 muestra una tabla con una lista de los sistemas físicos mas importantes y las variables de esfuerzo y flujo que corresponden a cada una .

En el caso eléctrico la energía asociada es  $V \cdot I$ , en el caso mecánico es  $v \cdot F$  o  $W \cdot \text{par}$ , y así sucesivamente. En el caso térmico las variables que representan mejor al sistema son la temperatura y el flujo entrópico. No obstante es posible utilizar otra forma donde el flujo es el calor ( o entalpía). Esta forma de trabajo es aproximada y recibe en la teoría el nombre de pseudobond.

En la teoría mencionada se utiliza una representación gráfica de los sistemas con un grado de abstracción bastante elevado, razón por la cual en el Simusol se ha preferido usar una representación gráfica más cercana al sistema físico, lo que facilita su dibujo e interpretación.

Para cada tipo de sistema físico es posible utilizar una plantilla que represente los elementos del sistema con íconos específicos. Tal es el caso del sistema térmico

que se ha detallado hasta ahora. Existe otra para el caso eléctrico En otros casos no se ha llegado a preparar una plantilla específica, en cuyo caso se utilizará una plantilla genérica con todos los elementos dibujados en blanco y negro. En este caso no se dispone de códigos de fórmulas a colocar en el cuadro de datos donde se describen los parámetros que describen cada elemento, sino que es necesario indicar en el cuadro de datos los valores finales de cada elemento.

Sistema Físico	Esfuerzo	Flujo
Eléctrico	Voltaje V	Corriente I
Mecánico(traslación)	Velocidad	Fuerza
Mecánico(rotación)	Velocidad angular	Par
Hidráulico	Presión	Flujo másico
Térmico	Temperatura	Entropía
Térmico(Pseudobond)	Temperatura	Calor(entalpía)
Transporte	Concentración	Flujo soluto

Fig. 3.1.- Muestra una tabla de sistemas físicos con su esfuerzo y flujo

Aquí no nos será posible entrar en detalles acerca de esta teoría general, por lo que en adelante ilustraremos la aplicación del Simusol a distintos sistemas físicos y sus combinaciones utilizando ejemplos concretos.

## 3.2.- LOS SISTEMAS TERMOELÉCTRICOS

Usaremos como ejemplo de sistema termoelectrico sencillo a un termistor cuyo esquema se muestra en la figura 4.18, incluyendo las conexiones necesarias para realizar una medida de temperatura con el mismo.

La medida de temperatura utiliza la propiedad de que la resistencia del termistor varía con su temperatura, de acuerdo a la fórmula siguiente :

$$R_t = R_{to} \cdot \exp[b \cdot (1/T - 1/T_o)]$$

(1)

Donde  $T_o$  es una temperatura de referencia,  $R_{to}$  es la resistencia correspondiente del termistor,  $T$  es la temperatura actual del elemento y  $R_t$  su correspondiente resistencia.  $b$  es un parámetro característico del termistor. Las temperaturas deben expresarse en grados Kelvin. En los manuales se pueden encontrar las características fundamentales de los termistores dedicados a mediciones de temperatura. Además de  $b$  y  $R_{to}$  se mencionan otras propiedades medidas tales como su disipación térmica, la potencia máxima que es capaz de soportar y la temperatura máxima a la que se aconseja su funcionamiento. Se ha elegido un

termistor miniatura encapsulado en vidrio (GM Electrónica, 2000) como referencia para preparar los circuitos que se presentan a continuación. La Tabla 3.2 muestra las propiedades del mismo, tal cual se detallan en el manual.

El análisis del comportamiento del termistor comprende dos partes: la eléctrica y la térmica. En la primera se coloca en los bornes del termistor una fuente de

corriente que atraviesa la resistencia del termistor y se mide la tensión que aparece entre bornes con el fin de determinar su resistencia, con la cual se obtiene la temperatura. En la segunda el termistor posee una masa con un cierto calor específico, la cual eleva su temperatura hasta ser similar a la del fluido cuya temperatura quiere obtenerse. Las dos partes interactúan entre si ya que la resistencia eléctrica depende de la temperatura y a su vez, el pasaje de corriente eléctrica produce una disipación térmica (efecto Joule) que afecta la temperatura del termistor.

Tabla 3.2 : Propiedades del termistor utilizado en el modelo

Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia eléctrica a 25 C	10000	ohms
Parámetro b	3500	K
Disipación térmica al ambiente	0.8	mW/C
Temperatura máxima de trabajo	200	C
Disipación máxima	2.50	mW
Diámetro	1.6	mm
Longitud	6.4	mm
Calor específico	835	W/kg.C
Densidad	2300	Kg/m3

El Simusol ha sido preparado para trabajar con circuitos eléctricos. Para ello se ha preparado una plantilla eléctrica que se encuentra junto a la plantilla térmica. La figura 3.3 muestra el diagrama que se ha preparado para simular al termistor, el que consta de un circuito eléctrico a la izquierda y uno térmico a la derecha. La resistencia eléctrica R4 representa los aspectos eléctricos del termistor. Se aprecia que esta resistencia está representada con un icono eléctrico. Los nodos 1 y 2 representan la diferencia de voltaje que se aplica entre las patas del termistor. La resistencia eléctrica disipa energía térmica cuyo valor se calcula con la fórmula de Joule  $VR_4 \cdot IR_4$ . Esta energía térmica se agrega al circuito térmico mediante el flujo de calor J4. Este circuito tiene un nodo int que representa la temperatura interna del termistor y una temperatura ambiente dada por el nodo ext. El termistor perderá calor hacia el exterior mediante una pérdida convectiva representada por R6. Finalmente, el termistor tienen una masa dada por el acumulador C4.

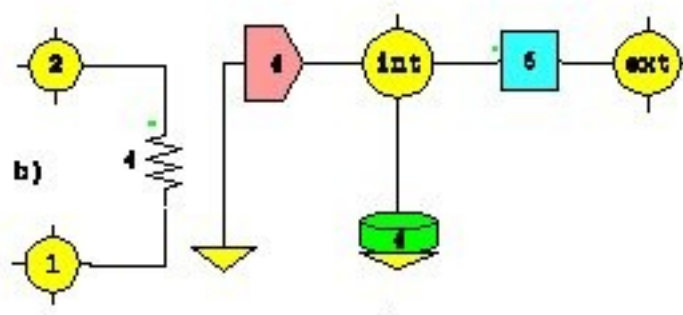


Fig.3.3.- Muestra el diagrama para simular al termistor

El termistor se ensaya alimentándolo con una fuente de corriente entre los bornes 1 y 2 e imponiendo una temperatura externa mediante una fuente, que se conecta en el nodo ext. La corriente seleccionada tiene un valor de 0.0001 A y la temperatura externa vale 50 C. Inicialmente el termistor se encuentra a una temperatura de 20 C y al ponérselo en contacto con la temperatura externa igual a 50 C se va calentando como función del tiempo hasta llegar al nuevo estado estacionario. La figura 3.4 muestra el resultado de la simulación, donde se aprecia que el termistor tarda alrededor de 2 minutos para llegar al nuevo valor estacionario.

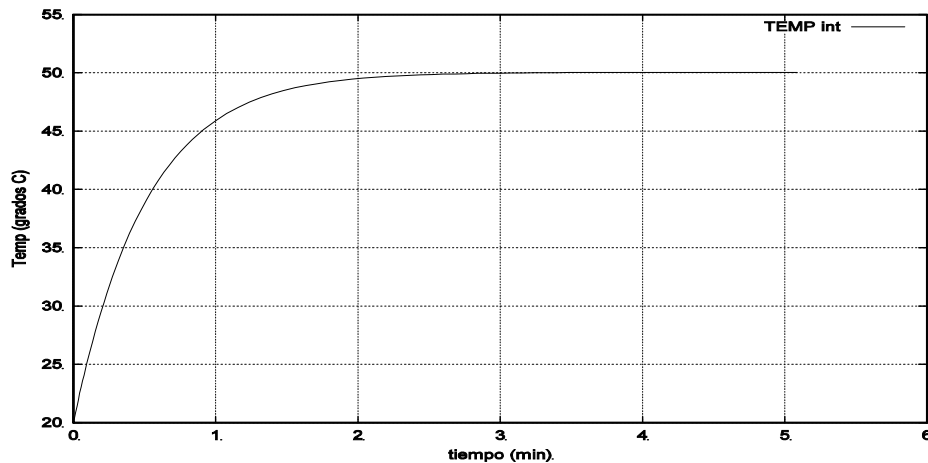


Fig.3.4.- Muestra la variación de la temperatura del termistor en grados centígrados en función del tiempo expresado en minutos. para llegar a un nuevo valor estacionario

La disipación térmica por efecto Joule tiende a levantar la temperatura del termistor por encima de aquella que debe medir, que es la temperatura ambiente. Este fenómeno se conoce con el nombre de “autocalentamiento” del termistor y se puede analizar realizando distintas corridas de simulación donde se adoptan valores crecientes de la fuente de corriente y se observa que diferencia de temperatura se obtiene. La tabla 3.5 muestra los valores obtenidos para corrientes entre 0.00005 y 0.0002A. Se aprecia que la diferencia de temperatura comienza a ser mayor que 0.1 C cuando la corriente pasa los 0.00015 A, por lo que un valor de 0.0001 A sería conveniente para tener un efecto de autocalentamiento despreciable. (aumento de temperatura menor a 0.04 C).

Tabla 3.5.- Error en la temperatura medida como función de la corriente de alimentación

Corriente (A)	Diferencia de Temperatura (C)
0.00005	0.01
0.0001	0.04
0.00015	0.09
0.0002	0.17

Como se aprecia, la simulación numérica del termistor se constituye en una herramienta muy valiosa para seleccionar el termistor más adecuado para realizar una cierta medida, pudiéndose variar tanto el termistor en sí como sus condiciones de operación con el fin de seleccionar los valores óptimos de los distintos parámetros.

## CAPITULO 4.- LOS SISTEMAS MECÁNICOS

Se ha visto en 3.1 que el Simusol puede simular sistemas físicos de diverso tipo, entre ellos los sistemas mecánicos. Existen dos tipos importantes, las masas puntuales en una o más dimensiones y los sistemas de rotación sobre un eje. Las variables para cada uno de ellos y su expresión de la potencia son:

SISTEMA	ESFUERZO	FLUJO	EXPRESIÓN POTENCIA
Masas puntuales	Velocidad $v$	Fuerza $F$	$v \cdot F$
Masas en rotación	Velocidad de giro $w$	Par $M_p$	$w \cdot M_p$

A continuación se verán algunos ejemplos. En el Simusol la velocidad  $v$  es un esfuerzo, por lo que reemplaza a la temperatura. Los nodos del diagrama serán las velocidades. El flujo es la fuerza, por lo que las fuerzas serán representadas por los flujos térmicos (las  $J$ ). Las masas de los puntos son las que acumula la energía, por lo que ellas serán representadas por un acumulador (la  $C$ ). Se recomienda usar el Simulación - Generico en el Dia.

### 4.1.- UNA MASA PUNTUAL SOBRE UNA RECTA.

La fig. 4.1 muestra un esquema del sistema mecánico. Una masa  $M$  se mueve sobre una trayectoria recta vertical bajo la acción de una fuerza gravitatoria  $FG$ . Parte de  $x=0$  con una velocidad inicial  $V_0$ . Es sabido que debido a la velocidad inicial la masa se elevará hacia arriba y su velocidad irá decreciendo bajo la acción de la fuerza gravitatoria hasta que la velocidad se hace nula. Allí invertirá el sentido del movimiento y caerá. La variación de  $x$  con el tiempo será una función parabólica de eje vertical.

A continuación la figura 4.2 muestra la representación del sistema mecánico en el Simusol.

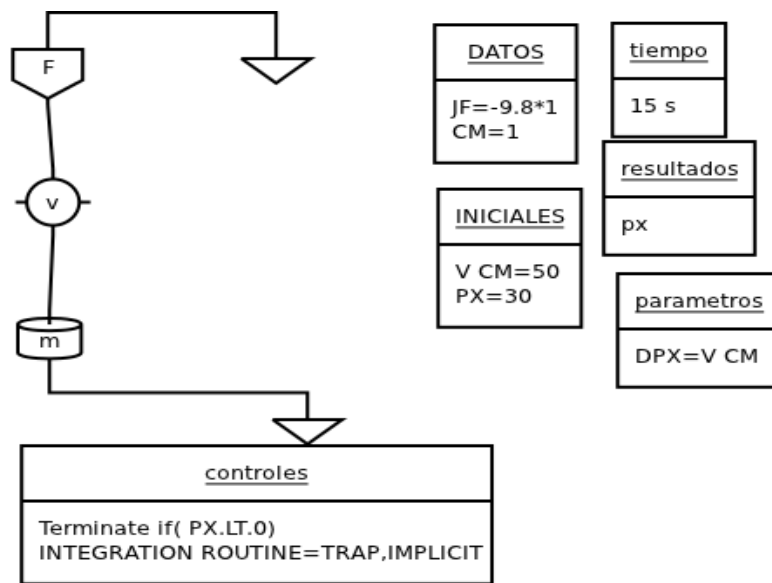


Fig 4.2.- Diagrama dia del

movimiento

La masa  $M$  tiene una velocidad  $v$  representada por un nodo del Simusol, al cual se conecta una capacidad  $C_m$  que representa la masa  $m$  del punto. Una fuente de corriente  $JF$  representa la fuerza gravitatoria. Se considera un parámetro  $P_x$  para trabajar con la variable física  $x$ . En el cuadro Iniciales se da el valor inicial de  $P_x$  y  $V_{CM}$ . La función  $x(t)$  que representa el movimiento se obtiene integrando la velocidad  $v$ . Para eso se da el valor inicial de  $x$  en el cuadro Iniciales y se introduce la integración de  $V$  mediante la expresión  $Dpx = V_{CM}$ . Obsérvese que dado que el condensador está colocado entre  $v$  y tierra, el voltaje de  $C_m$ ,  $V_{CM}$ , da el valor de  $v$ .

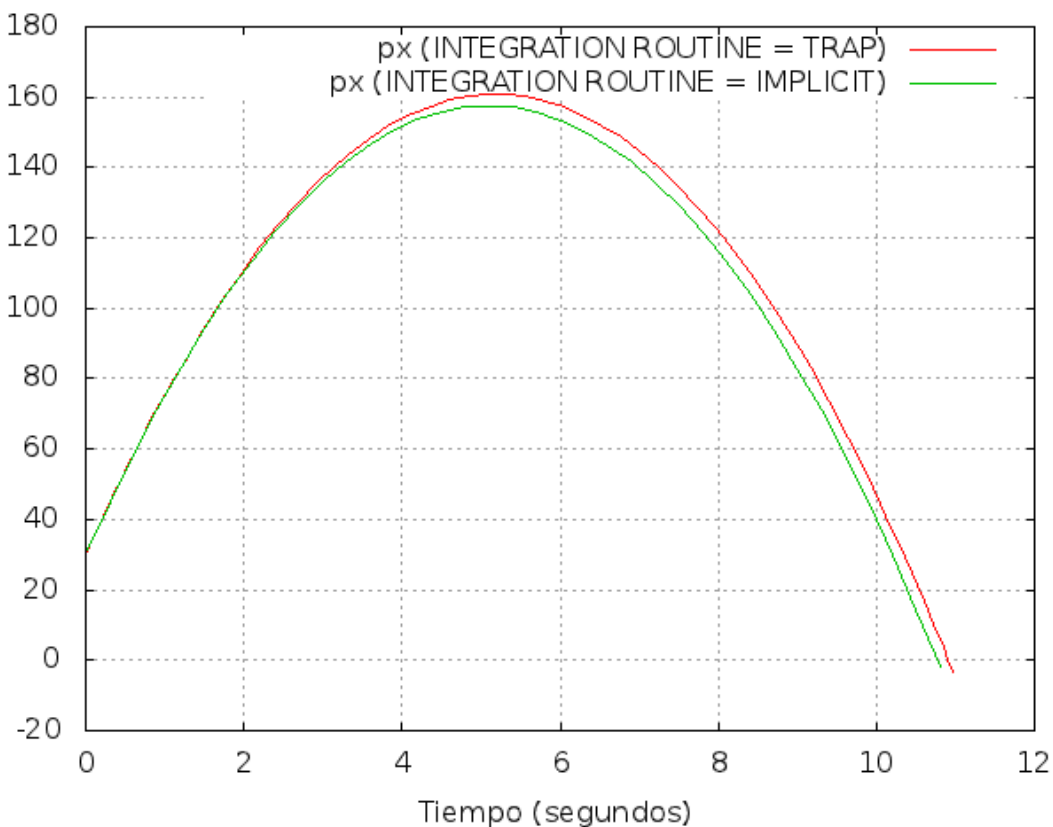


Fig. 4.3. Resultado del cálculo del movimiento vertical

La figura 4.3 muestra gráficamente la representación de la función  $x(t)$  obtenida mediante el cálculo numérico realizado por el Simusol. Aparecen dos curvas dado que en cuadro controles se ha requerido realizar dos cálculos distintos usando dos tipos de métodos de integración. Para los cálculos de sistemas mecánicos el método Implicit es el que da mejores resultados. En este caso la diferencia de resultados es pequeña.

## 4.2.-MOVIMIENTO DE UNA MASA PUNTUAL EN UN PLANO VERTICAL

Si la velocidad inicial  $V_0$  está inclinada respecto del eje  $x$ , el movimiento del punto tendrá lugar en dos dimensiones. La figura 4.4 muestra la nueva situación física. Allí se ha inclinado la velocidad y se ha agregado un eje horizontal  $y$ .

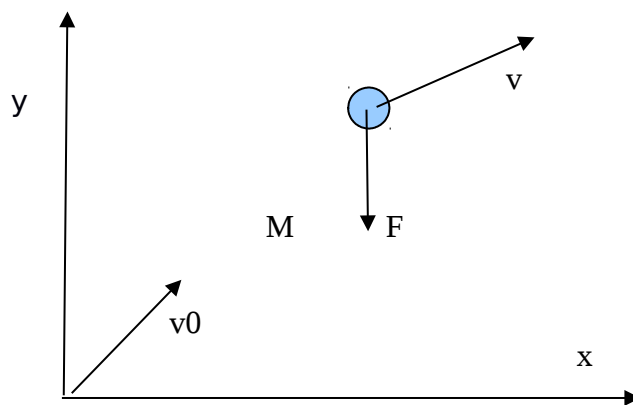


Fig. 4.4.- Movimiento de la masa  $m$  en un plano vertical.

En la Fig. 4.5 se muestra el diagrama Dia necesario para simular este ejemplo. Dado que ahora tenemos dos variables a calcular,  $x$  e  $y$ , deberemos introducir las dos componentes de la velocidad  $v$ ,  $v_x$  y  $v_y$ , y representar cada una con nodo diferente. La fuerza  $F$  tiene dos componentes,  $F_x$  y  $F_y$ . No obstante, la componente  $F_y$  vale cero, por lo que no se pone. Habría que agregarla si la fuerza  $F$  a aplicar no fuese vertical.

El diagrama muestra los nodos de velocidad  $v_x$  y  $v_y$  y la masa  $m_x$  y  $m_y$  conectada a los nodos. La masa es la misma y aparece dos veces porque se está dibujando el dibujo para la proyección en ambos ejes. La Fuerza es vertical por lo que sólo aparece en el diagrama de proyección sobre el eje  $y$ .

Se coloca la velocidad inicial proyectada sobre los dos ejes. Obsérvese que se identifican tomando la diferencia de tensión sobre las masas correspondientes.

Se integran las dos velocidades para obtener los valores de  $x$  e  $y$  (parámetros  $P_x$  y  $P_y$ ).

Con el fin de que se dibuje la trayectoria, con el cuadro “gráficos”se solicita el gráfico de Px en función de Py, el cual es una parábola.

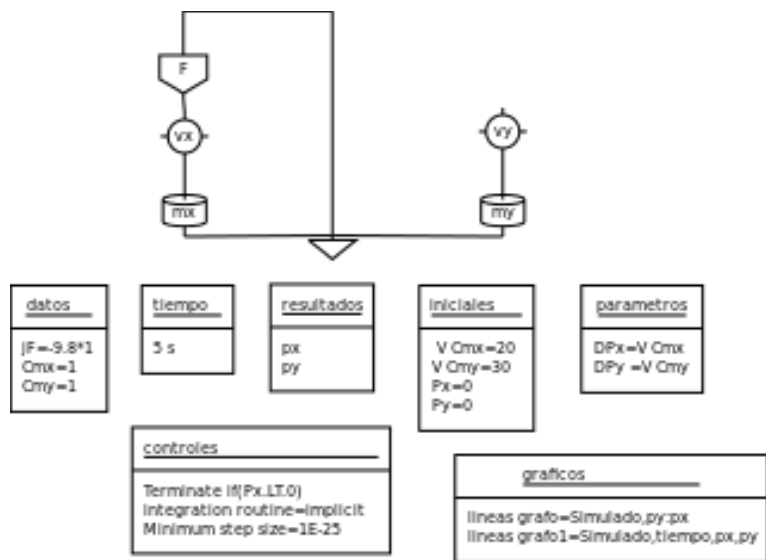


Fig 4.5.-Diagrama Dia del movimiento

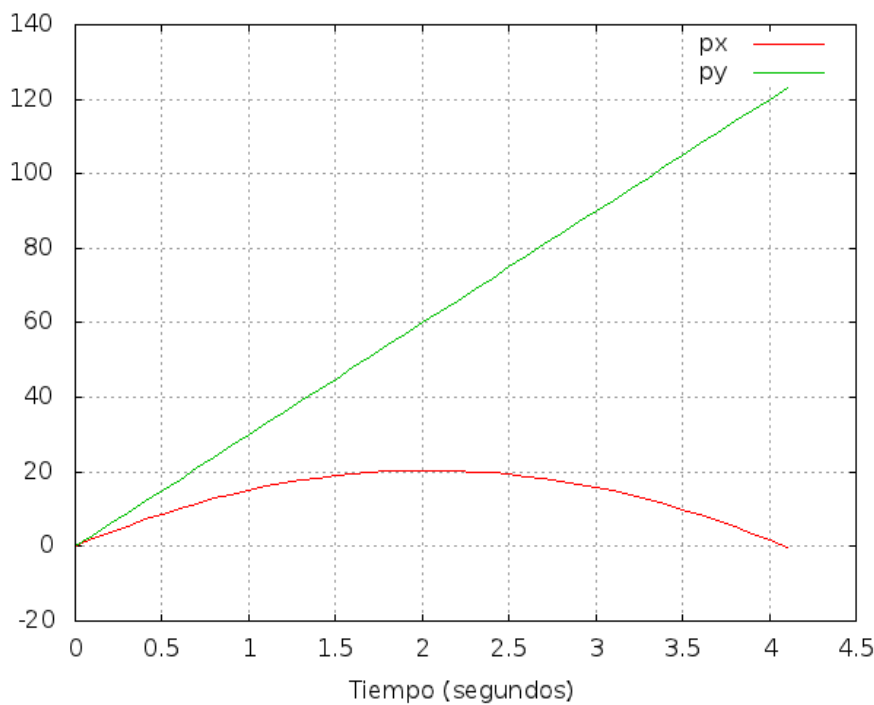


Fig. 4.6.-  
Gráfico  
de x e y en función del tiempo

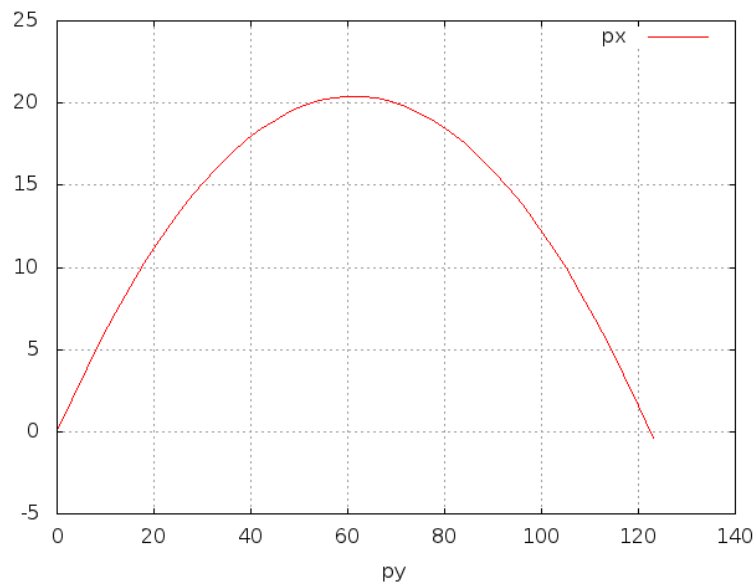


Fig. 4.7.- Gráfico del movimiento en el plano x - y

En un sistema térmico la energía puede ser acumulada mediante el aumento de temperatura de una masa dada. La masa se simula mediante una capacidad. No existe otra forma de acumulación.

No sucede lo mismo en el caso eléctrico donde existen dos formas de acumulación, mediante los campos eléctricos en un condensador o mediante un campo magnético en una inductancia.

En el caso del condensador la ecuación que determina la capacidad de acumulación es la que da la carga acumulada  $Q$  como:

$$Q = C * V$$

donde  $V$  es la diferencia de tensión entre bornes del condensador y  $C$  es la constante que determina la capacidad de carga. Si esta ecuación se deriva se obtiene la forma diferencial de la ecuación, donde aparece la corriente eléctrica  $I$  como derivada de  $Q$ :

$$I = C * dV/dt \quad \text{o} \quad dV/dt = I/C$$

En una inductancia el campo magnético en el arrollado es quien acumula la energía. La ecuación correspondiente es:

$$V = L * dI/dt \quad \text{o} \quad dI/dt = V/L$$

Como se aprecia se intercambia el rol de  $V$  e  $I$  en relación con la derivada.

En el caso mecánico, también existen dos tipos de acumulación: como forma de energía cinética de una masa  $m$  a velocidad  $v$ , o como energía acumulada en un material que se deforma. La forma más habitual de deformación es la que se produce en un resorte. La forma diferencial de la ecuación del fenómeno es:

$$v = L * dF/dt$$

donde  $v$  es la velocidad de la masa conectada con el resorte y  $F$  la fuerza que ejerce el resorte sobre la masa. Si se integra la ecuación se obtiene la expresión más común para un resorte. La integral de la velocidad  $v$  da la posición  $x$  y la derivada de  $F$  da lugar a  $F$ :

$$x = L \cdot F \quad F = x/L$$

que es la típica ecuación de un resorte donde F es proporcional al estiramiento del resorte.

El esquema físico del movimiento lineal de una masa sobre la cual se ejerce la fuerza de un resorte se muestra en la fig. 4.8:

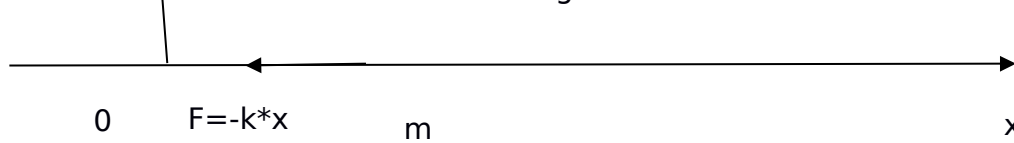


Fig. 4.8.- Diagrama físico del movimiento lineal oscilatorio.

El 0 indica la posición del extremo del resorte cuando no está estirado de manera que el valor  $x$  da directamente el estiramiento del resorte.

El diagrama Dia correspondiente a este movimiento se muestra en la Fig. 4.9. La recta es horizontal. Sobre la masa  $m$  se ejerce la fuerza  $F$  del resorte.

En la Fig. 4.10 se muestra el resultado del cálculo de la posición  $x$ , el que resulta ser un movimiento sinusoidal. Esto se debe a que existe una transferencia energética repetitiva entre los dos acumuladores: el condensador y la inductancia. No se podría obtener este tipo de resultados en un sistema térmico, donde existe un solo tipo de acumulador.

Se puede apreciar que 3 ciclos se realizan en 56,44 segundos lo que da un período de  $56.44/3=18.81\text{seg}$

La teoría de este movimiento indica que el período del mismo es

$$T = 2 \cdot \pi \cdot (M \cdot L)^{1/2} = 2 \cdot \pi \cdot (10 \cdot 0.9)^{1/2} = 18.84 \text{ seg}$$

dando un valor muy cercano al exacto, con un error de 1,6 por mil.

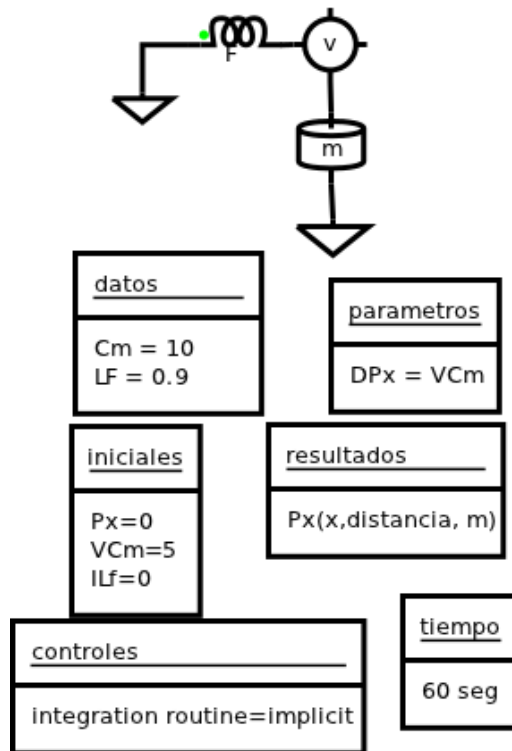


Fig.

4.9.- Diagrama Dia del movimiento oscilatorio de una mas

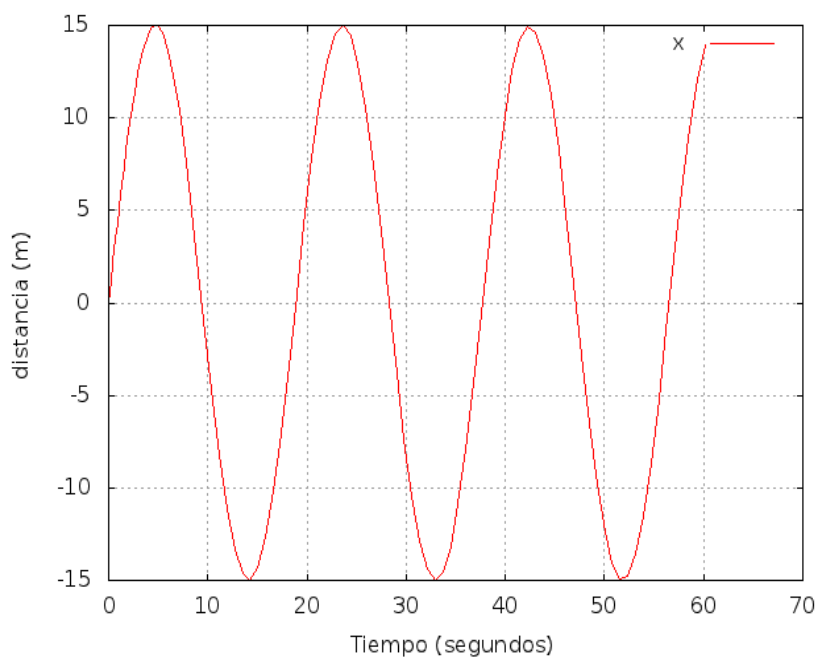


Fig.- 4.10. Posición x del punto como función del tiempo.

## 4.3.- EL TRANSFORMADOR

En algunos casos se plantean diagramas Dia en los cuales se trabaja con distintos tipos de parejas (esfuerzo, tensión ). por ejemplo, en un sistema mecánico existe un punto material que se mueve sobre una recta y otro que avanza sobre un círculo. Uno de ellos usa la pareja (v,F) y el otro usa (w,Torque). Es posible poner en contacto físico a uno con el otro permitiendo su interacción. A esos efectos se introduce la noción de transformador.

Un caso muy sencillo es el de dos circuitos eléctricos de alterna que trabaja uno de ellos a 110 VAC y otro a 220 VAC. Si van a trabajar en conjunto es posible unir los dos circuitos para lo cual se utiliza un elemento llamado “transformador”. Este nombre luego es generalizado al caso de otras variables físicas. El sistema físico se esquematiza en la figura 4.11. En dos de sus bornes se conecta un circuito a 110 VAC y en la otra pareja un circuito a 220 V. Físicamente el equipo recurre a un circuito magnético con dos arrollados con distinto número de vueltas. Los dos arrollados producen un campo magnético en el circuito de hierro que permite la transmisión de energía sin contacto eléctrico, es decir sin transmitir electrones entre los dos en forma directa.

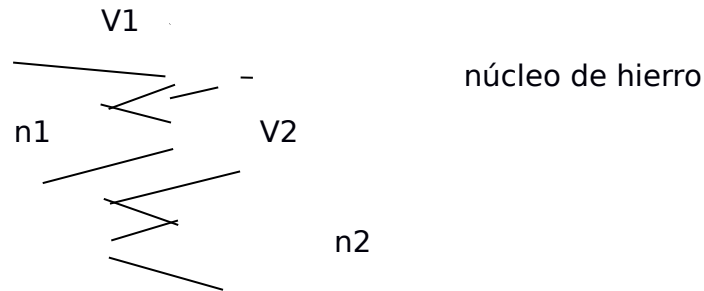


Fig. 4.11 .- Muestra un esquema del transformador con los dos bobinados de  $n_1$  y  $n_2$  vueltas

y las tensiones de entrada y salida  $V_1$  y  $V_2$

Si el transformador no tiene pérdidas la relación de voltajes es igual a la de vueltas:

$$V_2 = (n_2/n_1) \cdot V_1$$

La energía se transmite a través del campo magnético y se conservará de no haber pérdidas:

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \quad \rightarrow \quad I_2 = (n_1/n_2) \cdot I_1$$

Obsérvese que la transferencia de voltajes y corrientes está regida por una constante

$$P_n = n_2/n_1, \quad V_2 = P_n \cdot V_1, \quad I_2 = P_n \cdot I_1$$

Estas expresiones se generalizarán a otros casos físicos a estudiar.

## 4.4.- SIMULACIÓN DE UN TRANSFORMADOR MEDIANTE SIMUSOL

La próxima etapa es la de simular el transformador utilizando los elementos disponibles en el simusol

Supongamos que se dispone de un diagrama Dia con un nodo llamado “a” y otro diagrama con un nodo “b”. se desea unir los dos circuitos aunque sus pares flujo-esfuerzo sean diferentes. El diagrama que se propone se muestra en la figura 4.12.

Ante todo debe disponerse del parámetro  $P_n$  que define la transformación. Esto debe ser deducido mediante un análisis físico del problema escribiendo las ecuaciones que definen los circuitos a unir y despejando las mismas de manera de obtener la dependencia de  $J_b$  con  $I_{Ea}$  y la de  $E_a$  con  $V_{jb}$ .

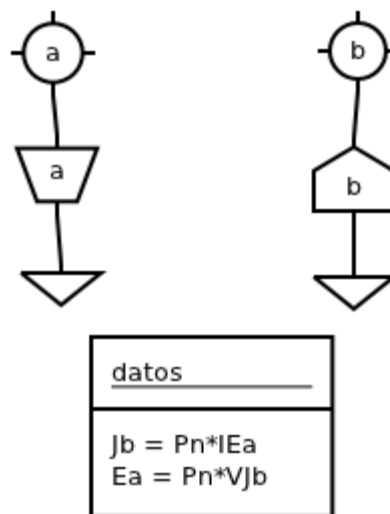


Fig. 4.12.- simulación de un transformador en el Simulink mediante el Dia.

El coeficiente de las dos relaciones será  $P_n$ :

$$I_b = P_n \cdot I_a \quad V_a = P_n \cdot V_b$$

Ahora hay que definir la tensión de la fuente a y la corriente de la fuente b. Para eso se usan las dos relaciones obtenidas con el estudio de los circuitos y se coloca en el recuadro de datos como se aprecia en la fig. 4.12.

De esta forma los dos circuitos interactúan entre sí transmitiendo corrientes y tensiones de acuerdo con las ecuaciones deducidas de los circuitos sin necesidad de conectar directamente los dos circuitos mediante conexiones materiales.

A continuación se verá una aplicación sencilla relacionada con un sistema mecánico que contiene un movimiento lineal y otro rotacional unidos a través de un cable.

## 4.5.- Cilindro rotando bajo la acción de una masa que cae.

La Fig. 4.13 muestra el sistema mecánico a simular. En un cilindro de radio  $r$  se enrosca un cable cuyo extremo cuelga sosteniendo una masa  $m$ . El cilindro, de momento de inercia  $I_n$ , gira con una velocidad angular  $w$  bajo la acción de una fuerza  $F_1$  ejercida a través del cable. Esta fuerza genera un torque  $T_{or} = r \cdot F$  sobre el cilindro. La masa  $m$  cae con una velocidad  $v$  bajo la acción de la fuerza de gravedad  $mg$  y el cilindro ejerce sobre la masa una fuerza de reacción  $-F_1$ .

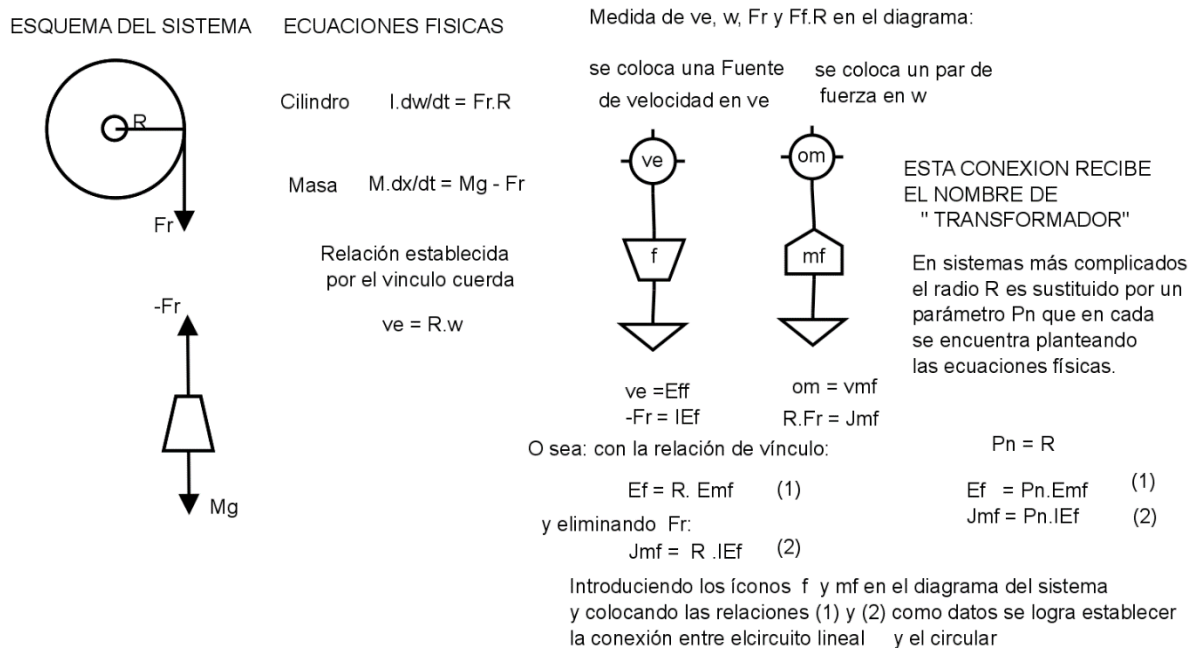


Fig.

4.13.- Cilindro que rota a velocidad angular  $w$  bajo la acción del peso  $m$  que desciende a la velocidad  $V$ .

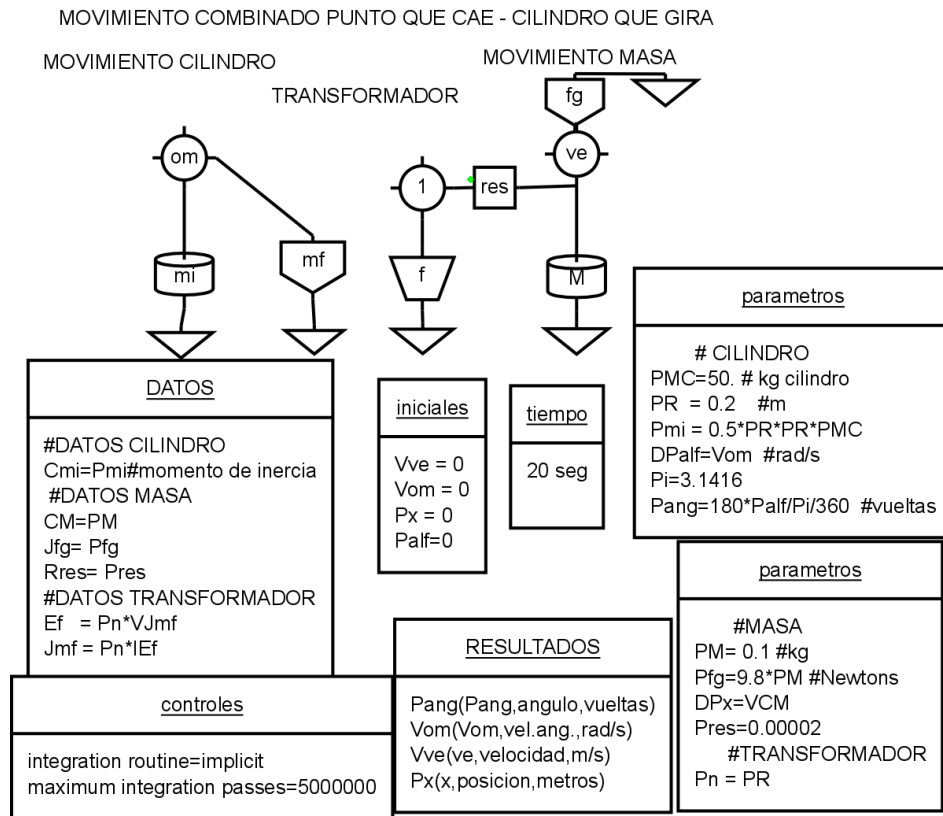
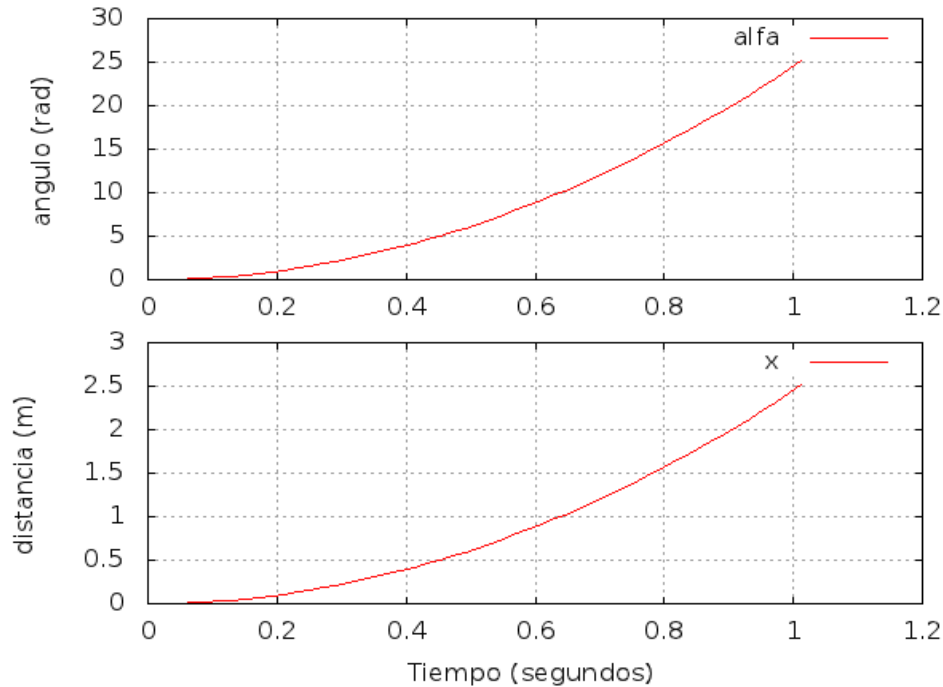


Fig.; 4.14.- Diagrama del sistema mecánico cilindro-masa

La Fig. 4.15 muestra resultados de la posición alfa del cilindro en radianes, la distancia x en metros y la velocidad ve en m/s.



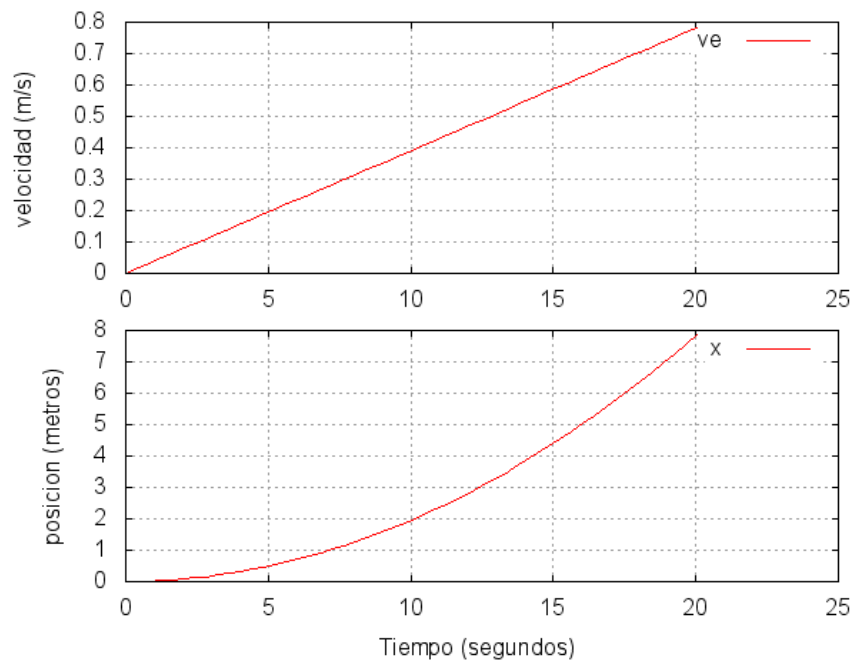


Fig. 4.15

valores de la velocidad angular del cilindro (rad/seg), de la velocidad  $v_e$  y la posición  $x$  lineal de la masa (m/s). La variación lineal muestra que las curvas de la figura inferior son parábolas

## 4.6.- Masa empujada por un gas caliente dentro de un tubo

A continuación se verá un ejemplo sencillo de un sistema termo-mecánico. El mismo se esquematiza en la fig.4.16.

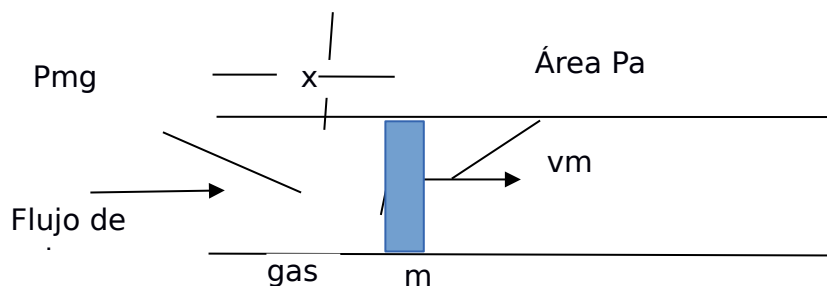


Fig. 4.16.- Esquema físico del equipo con gas encerrado por un pistón en un cilindro.

Un cilindro cerrado en un extremo contiene un pistón de masa  $m$  que encierra en el espacio una masa  $P_{mg}$  de aire. Cuando el aire se calienta con un flujo de calor  $q$  el aire aumenta su temperatura, presión y volumen, empujando el pistón hacia la derecha a una velocidad  $v_m$ . Se calculará el espacio recorrido  $x$  por el pistón. . Esto constituye una primer versión de un rifle donde el calor es entregado por la explosión de la pólvora de la bala. El pistón hace las veces de bala.

Este es un ejemplo térmicamente especial dado que el gas tiene una evolución no habitual que no se puede asimilar a una evolución a volumen o gas constante. Por tanto la ecuación habitual donde aparece el calor específico y se puede deducir el aumento de temperatura de acuerdo al flujo de calor no es aceptable. Para describir el comportamiento térmico del gas recurriremos directamente a la ecuación de conservación de la energía.

El gas está recibiendo un flujo de calor dado por  $q$  y está bajo una presión dada por el pistón, la cual variará a medida que el mismo se mueve. Por otro lado se sabe que la energía interna del gas está dada por el calor específico a volumen constante por la expresión  $C_v * P_{mg} * dT$ . La cantidad de calor recibida en e intervalo de tiempo  $dt$  será  $q * dt$  y el trabajo ejercido por el pistón sera  $pre * dVol$  donde  $pre$  es la presión que el pistón ejerce sobre el gas y  $Vol$  es el volumen del gas.

De acuerdo al primer principio de la termodinámica se cumplirá:

$$C_v * P_{mg} * dT = qdt - pre * dVol$$

Observemos además que la variación de volumen está ligada a la velocidad  $u$  del cilindro teniendo en cuenta que en el tiempo  $dt$  el cilindro se correrá en el espacio  $u * dt$  y como el área barrida será la sección del pistón  $P_a$ , se tiene:

$$dVol = P_a * u * dt$$

el signo es positivo ya que si  $u$  es positivo el pistón se corre hacia la derecha aumentando la distancia  $x$  del pistón y el volumen es  $P_a * x$ .

El comportamiento térmico del gas está dado por esta ecuación, la cual se representa en un diagrama Día como se muestra en la figura 4.18. Como nodo tendremos el de temperatura  $t$ . El coeficiente que multiplica a  $dT$  en la ecuación puede interpretarse como una masa térmica lo cual se incluye como un acumulador conectado al nodo. El calor estará dado trabajo por una fuente de corriente llamada “ $q$ ”. El trabajo mecánico estará dado por otro flujo de energía cuyo valor es  $pre * PuPa$  por lo que lo llamamos “ $pua$ ”

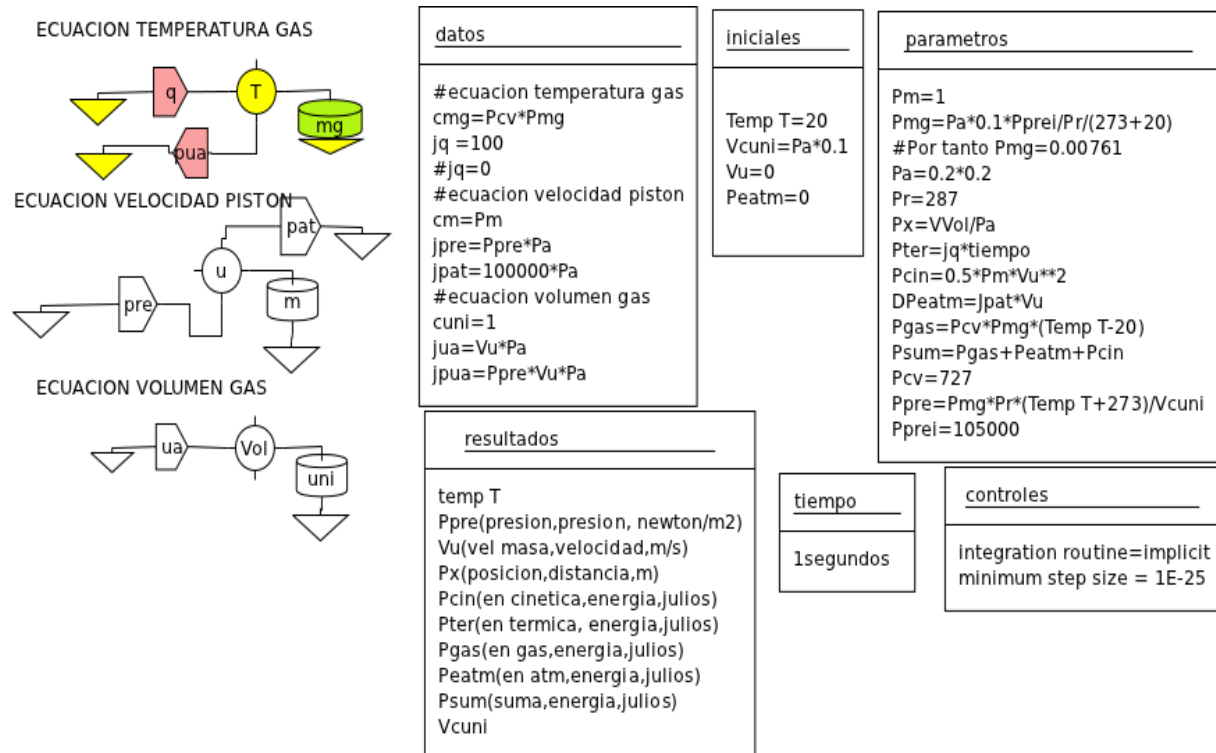


Fig. 4.18.- Diagrama Dia que representa la simulación del modelo de rifle.

La ecuación para la variación del volumen se puede introducir por dos vías alternativas. Una es realizar directamente la integral de Vol usando la expresión para una derivada y dando el valor inicial de Vol. la otra es interpretar la ecuación como la de una masa, cuyo coeficiente es la unidad y a la cual llega una corriente dada por  $Pa * u$ . Vamos a usar la segunda, que se puede ver en el diagrama Dia de la figura 4.18. La “masa” es el coeficiente de vol, igual a uno, por lo que lo llamaremos “uni”

Finalmente introducimos la ecuación diferencial del movimiento del pistón. Ya que conocemos todos los flujos y esfuerzos, la escribimos directamente. La variable esfuerzo es la velocidad  $u$  del pistón que aparece como nodo, del cual culega la masa  $Pm$  del mismo. Sobre él se ejercen dos fuerzas, la presión interna del gas y la presión externa atmosférica, ambas multiplicadas por el área  $Pa$  en las que se ejercen, a las que llamamos  $pre$  y  $pat$ , y a las que en el diagrama aparecen como parámetros  $Ppre$  y  $Pat$ .

Los tres diagramas corresponden a sistemas físicos diferentes: térmico, mecánico y volumétrico, pero el Simusol no tiene problemas en resolverlos en forma conjunta. Los mismos actúan en forma interactiva. EL volumen está usando la velocidad  $u$  que es mecánica, En el mecánico se usa la presión interna del gas, calculada en función de la temperatura  $T$  y el Volumen Vol. En el térmico aparecen la presión, donde se usa el volumen, y la velocidad  $u$  del pistón. La solución conjunta de las tres ecuaciones resuelve el problema.

Finalmente, la posición  $x$  del pistón, que determina el volumen en cada instante, se obtiene por integración de  $u$ .

Existen varios parámetros, algunos con valores independientes y otros que se calculan en el programa. La presión inicial  $Pprei$  es un valor que se elige con anterioridad. Ambos permiten además calcular la masa de gas inicial  $Pmg$ . En cambio, la masa del pistón,  $Pm$ , se da con anterioridad. También se dan le calor

específico  $P_{cv}$ , el área del pistón,  $P_a$ , la constante de los gases  $P_r$ , y los tres valores iniciales de las variables nodales, temperatura  $T$ , velocidad del pistón  $V_u$  y volumen inicial  $V_{cuni}$

Con fines de control se calcula la energía térmica que se va entregando, dada por  $q$ , y aquellas en la que se distribuye, la energía cinética del pistón, el trabajo de la presión atmosférica que se va perdiendo y la energía entregada al gas que se calienta. La suma de las tres debe dar la primera.

Existe un fenómeno físico que no se ha tenido en cuenta en el proceso; El movimiento del gas, el que se absorbe en forma cinética. Teniendo una distribución no concentrada no se puede evaluar en el Simusol. No obstante, en este caso es prácticamente despreciable dado que la masa de gas es de unos pocos gramos.

A continuación se muestran algunos de los cálculos realizados en las figuras 4.19 a 4.21.

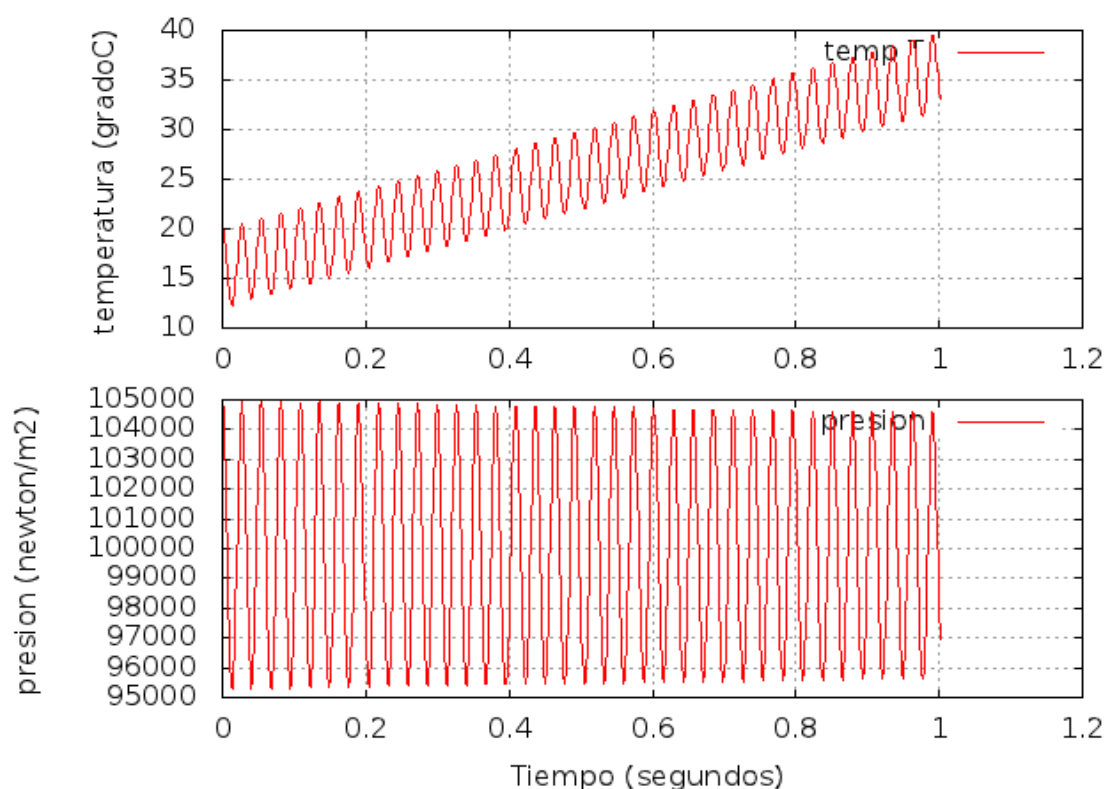


Fig.4.19.- Temperatura y presión del gas.

Fig. 4.20.- Posición y velocidad de la mas

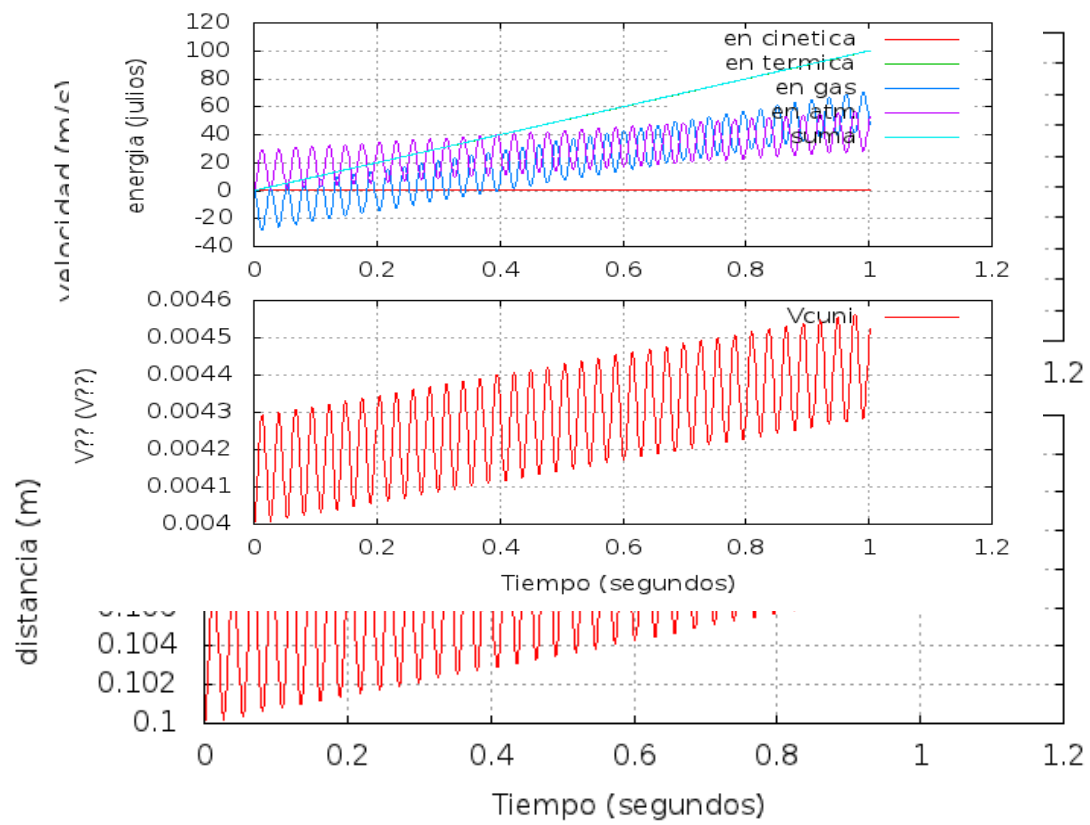


Fig.4.21.- Volumen del gas y balance energético del sistema.

# CAPITULO 5.- EJERCICIOS

## RESOLUCION DE LOS PROBLEMAS PROPUESTOS

Estos ejercicios han sido usados en clases de ejercicios dictados en un curso. Son muy similares con los que figuran en este tutorial. Al lado de cada número se indica a cual de los ejercicios de este tutorial son iguales o similares.

Algunos de los ejercicios no figuran en el tutorial.

## 5.1. EJERCICIOS PARA RESOLVER EN CLASE

1.- Ponga en marcha el programa Dia, Observe los tipos de diagrama disponibles. Elija Circuitos Térmicos y practique la colocación de los íconos en el escritorio. Observe los tipos de unión. Practique la unión de íconos con las distintas uniones. Pruebe el contenido de los menús. Defina una carpeta para guardar el diagrama y ejecute la operación.

2.-(similar al 1.3 pero totalmente resuelto) Un tanque con 100 kg de agua se encuentra a 80 C colocado en una habitación cuya temperatura es de 20 C. Calcular la evolución de la temperatura de agua durante 6 horas y muestre los resultados para la temperatura del agua y el aire así como la pérdida térmica a través de las paredes del tanque.

Coeficiente de pérdida de la pared al aire = 10 W/m<sup>2</sup>.C, Área de contacto del tanque con el aire = 2 m<sup>2</sup>.

3.- (1.4 a 1.6) Dos paredes planas paralelas con un área de 2 m<sup>2</sup> están en contacto con aire entre ellas y se encuentran a las temperaturas de 20 C y 150 C. Las paredes están en buen contacto con masas de agua de 200 kg cada una.

El aire está a 50 C. Las dos paredes transmiten calor por convección hacia el aire con un coeficiente convectivo h igual a 10 W/m<sup>2</sup>.C. Entre ellas se intercambia calor radiativamente pudiéndolas considerar como cuerpos negros. Esquematizar el sistema y calcularlas las temperaturas y los flujos de calor resultantes. ¿Cuál es la temperatura final de equilibrio de las dos masas?

4.- (1.8) Un colector solar está formado por un tanque con un área de 2 m<sup>2</sup> y un espesor de 2 cm expuesto al aire a

través de un vidrio. Se supone que el tanque tiene una temperatura uniforme y pierde calor hacia el exterior a través del aire con un coeficiente convectivo igual a 5 W/m<sup>2</sup>.C. Una bomba mueve el agua del colector a otro tanque de 150 litros a temperatura uniforme. El agua retorna al colector después de mezclarse con el agua del tanque. El colector recibe a través del vidrio una radiación constante igual a 600 W/m<sup>2</sup> durante 8 horas. Se supone que la temperatura del aire es constante e igual a 20 C y que la temperatura inicial de ambos tanques es igual a 15 C. Calcular la evolución de la temperatura del tanque de almacenamiento. Se supondrá que el fondo del colector y el tanque son adiabáticos.

5.-(2.1) El muro colector acumulador de un local es de hormigón con un espesor de 0.3 m y un área de 9 m<sup>2</sup>. Recibe una radiación solar dada por una tabla. La temperatura ambiente varía con el tiempo según otra tabla. Modelizando el muro mediante 2 puntos colocados sobre sus dos superficies, llevar a cabo la simulación del funcionamiento del muro durante 24 horas. El local tiene una temperatura constante de 20 C.

Hormigón: coeficiente conductivo=2.5 w/m.s, densidad=2400 kg/m<sup>3</sup>

Coeficientes convectivos: muro al exterior= 5w/m<sup>2</sup>.C, pared-local= 8 w/m<sup>2</sup>.C

Tabla radiación: 8h-0, 9-100, 10-360, 11-580, 12-700, 13-700, 14-589, 15-360, 17-100, 18-0, resto 0.

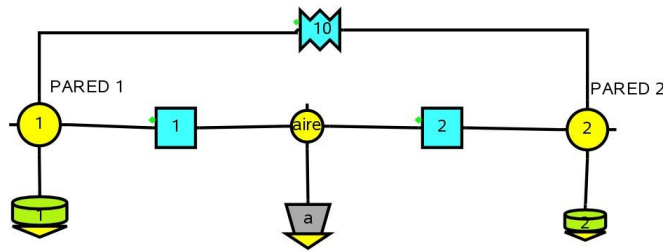
Tabla Temp.: 0-0, 3--1, 5—2, 7—3, 8—3, 9-0, 10-3.5, 11-7, 12-9.5, 13-12, 14-14,15-15,16-13, 17-11, 18-9.5, 19-8, 20-6.5, 21-5, 22-2.5, 23-1,24-0

6.- Un muro vertical con un área de 10 m<sup>2</sup> está constituido por un material de cambio de fase con un peso total de 900 kg. El material está en un recipiente metálico que no influye térmicamente. El muro tiene calores específicos en fase líquida y sólida y un calor de cambio de fase que comienza a los 50 C. Sobre el muro incide una radiación solar de 800 W/m<sup>2</sup> que se supondrá constante durante 6 horas. El muro pierde al aire por la cara que recibe el sol. La otra cara es adiabática. La temperatura del aire es constante e igual a 20 C, la inicial del muro es de 20 C. Determinar la variación de temperatura del muro y su eficiencia de colección de la radiación recibida

Cpsólido= 2000 J/kg.C, Cplíquido = 3000 J/kg.C, qcf=160000 J/kg

7.-(2.2) Un tanque con 100 kg de agua está calentado por una fuente térmica. Se utilizará un controlador para mantener cuasi constante la temperatura del agua una vez que la misma llegue a 50 C. Simular el controlador con el Simusol. Se supone que el tanque está en un ambiente de aire a 0 C y que el tanque pierde calor a través de sus paredes con una constante convectiva de 10 w/m<sup>2</sup>.C. El área de contacto del tanque con el aire es de 1 m<sup>2</sup>. Para resolver este problema se utilizará la función de Fortran llamada Dsign(a,b), donde a es un número a elegir y b un dato. La función pasa el signo de la variable b a la variable a.

### Ej. 3 - DOS PAREDES PLANAS ENFRENTADAS

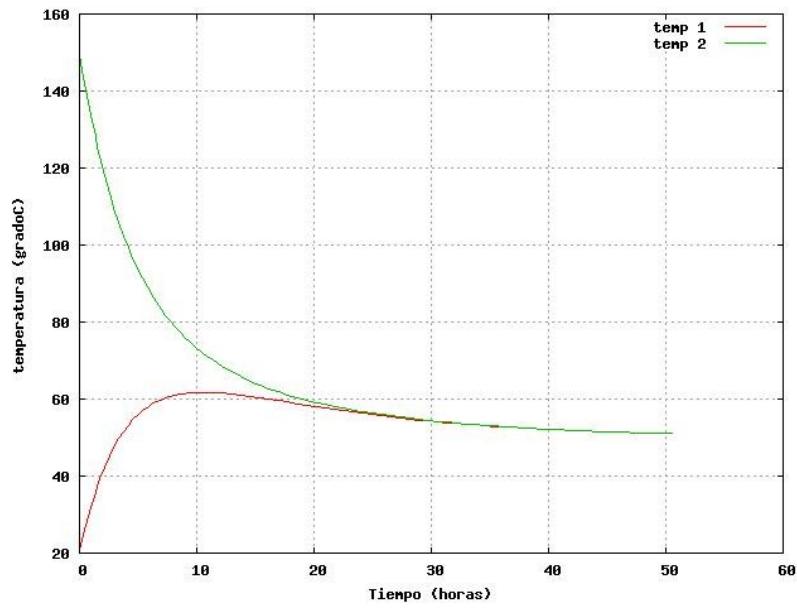


datos
R1=R2=V1,2,8
R10=R1,2,1,1
Ea=50
C1=C2= C1,4186,200

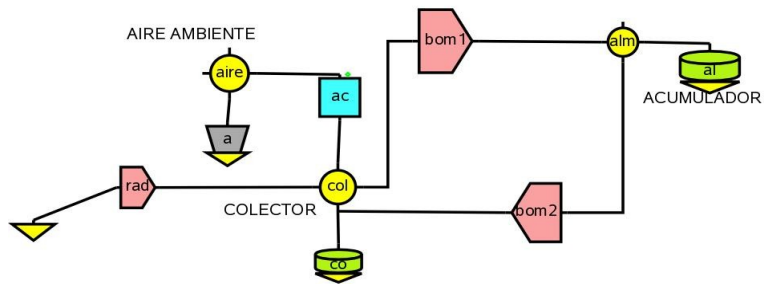
iniciales
Temp 1=20
Temp 2=150

tiempo
50 horas

resultados
temp 1
temp 2



#### Ej. 4 - COLECTOR SENCILLO CON TANQUE ACUMULADOR

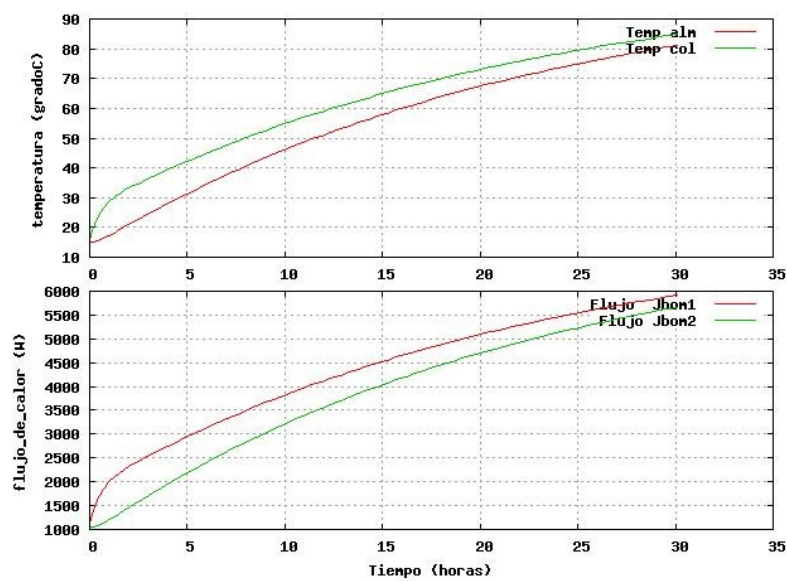


datos
Rac=v1,2,7
Ea=20
Jrad=JQ,2,600
Jbom1=Jbom2=JM,4186,1/60
Cco=C1,4186,40
Cal=C1,4186,200

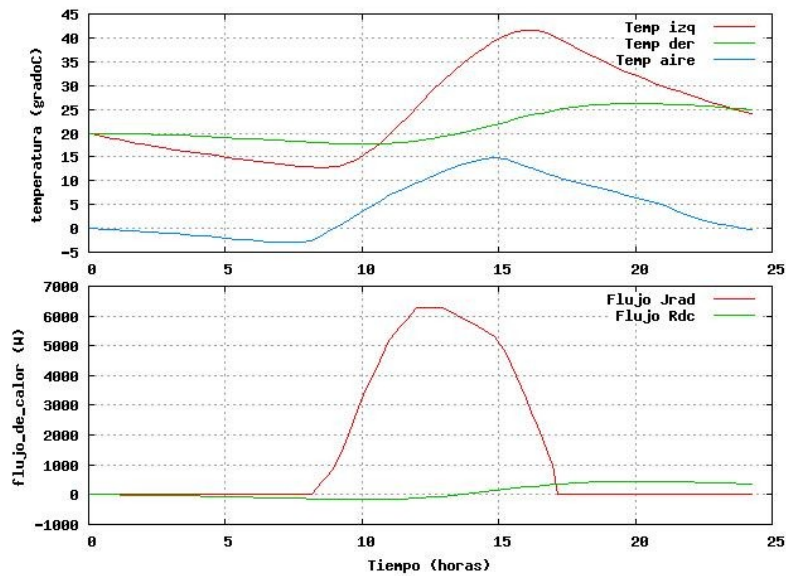
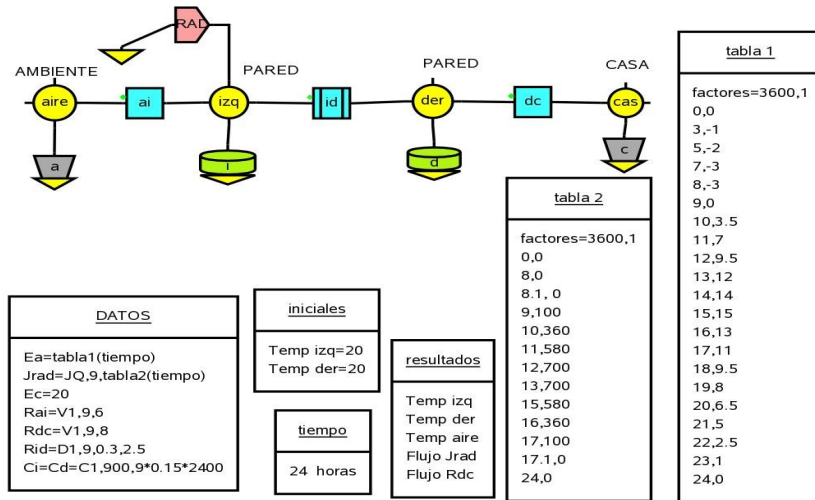
tiempo
30 horas

iniciales
Temp col = 15
Temp alm = 15

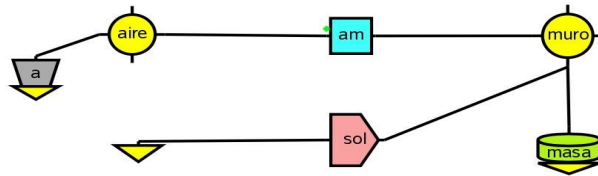
resultados
Temp alm
Temp col
Flujo Jbom1
Flujo Jbom2



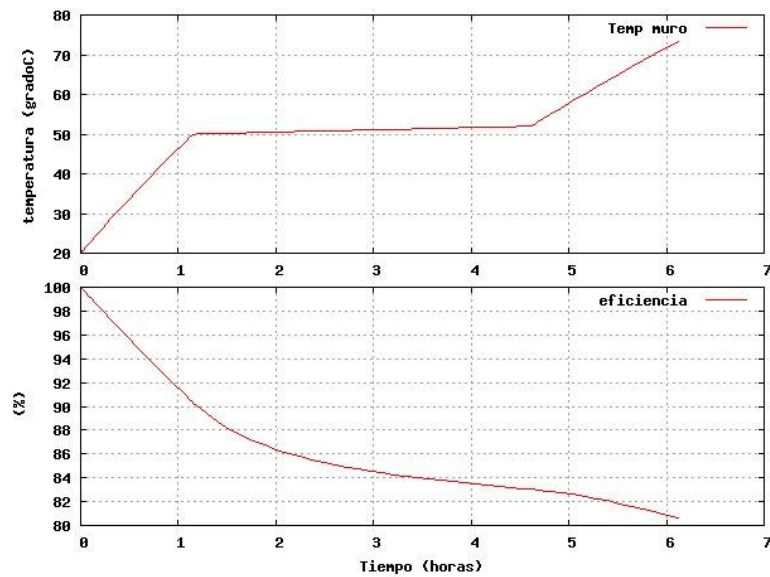
# Ej. 5 - PARED ACUMULADORA CON RADIACION



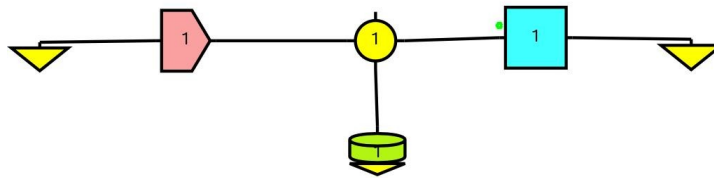
# Ej. 6 - ACUMULACION CON CAMBIO DE FASE



<u>datos</u>	<u>tabla1</u>	<u>parametros</u>
Ram=V1,10,5 Cmasa=C1,tabla1(temp muro),500 Jsol=JQ,10,800 Ea=20	0,P1 50,P1 50,P3 52,P3 52,P2 100,P2	P1=2000 P3=80000 P2=3000 Pqsol=800 DPeper=5*10*(temp muro-temp aire) DPesol=Pqsol*10 Pef=100 * (Pesol-Peper)/Pesol
<u>iniciales</u>	<u>resultados</u>	<u>tiempo</u>
Peper=0 Pesol=0 Temp muro=20	Temp muro Pef(eficiencia,??,%)	6 horas
		<u>controles</u>
		integration routine=implicit



# Ej. 7 -SIMULACION DE CONTROLADOR PARA MANTENER CONSTANTE LA TEMPERATURA



<u>datos</u>	<u>parametros</u>	<u>tabla1</u>	<u>tabla2</u>
R1=V1,1,10 C1=C1,4186,100 J1=JQ,1,1000*Pq	Pa=dsign(1,flujoC1) Pq1=1/2+Pa/2 Pq2=1/2-Pa/2 Pq=Pq1*tabla1(Temp1) +Pq2*Tabla2(Temp1)	0,1 50,1 50,0 100,0	0,1 48,1 48,0 50,0 100,0
<u>resultados</u>	<u>tiempo</u>	<u>iniciales</u>	<u>controles</u>
temp 1 flujo C1	12 horas	Temp1=20	integration routine=implicit

