



**Facultad de Física**

**Laboratorio Termodinámica FIZ 0211**

# **Motor Stirling**

## **1. Materias**

Cambios de estado termodinámicos, magnitudes de estado, ciclos, energía, entropía, gas ideal, máquina térmica motriz, máquina motriz térmica, eficiencias

## **2. Literatura**

- Bergmann-Schäfer '*Lehrbuch der Experimentalphysik Bd.1*' (manual de física experimental - tomo 1), de Gruyter, Berlín

- Gerthsen, Kneser, Vogel '*Physik*' (física), Springer, Berlín.

- Eichler, Kronfeld, Sahn, '*Das Neue Physikalische Grundpraktikum*' (nueva práctica básica en física), Springer, Berlín.

- Falk, Ruppel, '*Energie und Entropie*' (energía y entropía), Springer, Berlín.

- Stephan, Mayinger, '*Thermodynamik Bd.1*' (termodinámica - tomo 1), Springer, Berlín.

## **3. Preguntas para la preparación**

1. Indique la ecuación de estado para un gas "ideal" y de un gas "real". Fundamente las diferencias.
2. ¿Qué es entropía? ¿de qué dependen la entropía y la energía interna de un gas ideal?
3. Describa el primer principio de la termodinámica y aplíquelo a una expansión isotérmica, isocórica y adiabática en un gas ideal.
4. ¿Qué cambios de estado se desarrollan espontáneamente en la naturaleza? Formule el segundo principio de la termodinámica.
5. ¿Qué formas de energía se presentan en el experimento de motor Sterling? ¿cómo se miden?
6. ¿Qué es un ciclo reversible? ¿por qué las máquinas termodinámicas pasan por ciclos?
7. Bosqueje el diagrama  $T-S$  de una máquina Carnot y de una máquina Stirling. ¿Qué significado tiene el regenerador en el motor Stirling en este cuadro?
8. ¿Cómo se define (con sentido) en general la eficiencia de una máquina? ¿cuál es la diferencia entre la eficiencia "termodinámica" y la eficiencia "efectiva" de una máquina?
9. Bosqueje los diagramas  $p-V$  para un motor de aire caliente, la bomba de calor y la máquina enfriadora. Explique cómo se calculan gráficamente, a partir de los diagramas, las respectivas eficiencias termodinámicas.
10. ¿Qué ventajas y desventajas presenta el motor Stirling frente a otros motores?

## 4. Fundamentos

La termodinámica es la ciencia general de la energía. Estudia las diversas manifestaciones de la energía y la transformación de un tipo de energía en otro. La termodinámica es una de las áreas básicas de la física, dado que prácticamente no existe un proceso físico sin transformación de energía. En el proceso Stirling observamos cambios de energía en un medio gaseoso. El contenido energético de un gas está determinado por las magnitudes físicas medibles de volumen  $V$ , presión  $p$  y temperatura  $T$ . Para no tener que limitarse al concepto de energía, también puede observarse el estado de un gas determinado por las magnitudes de estado  $p$ ,  $V$  y  $T$ . En el caso del gas ideal, éstas se relacionan mediante la ecuación de estado

$$pV = nRT \quad (1)$$

en que  $n$  corresponde al número de moles del gas en el volumen  $V$  y  $R = 8,314\text{J}/(\text{mol K})$ , la constante de los gases.

Si el gas se encuentra en un cilindro que en un lado está cerrado por un pistón (émbolo) móvil (ilustración 1), la magnitud del volumen  $V$  está determinada por la posición del pistón. Un dispositivo que convierte el movimiento del pistón con un cambio periódico del volumen del gas mediante una excéntrica en movimiento rotatorio, se denomina máquina de pistón. En ello, los cambios de volumen pueden originarse por diversos procesos físicos (por ejemplo, combustión, aporte de vapor o calor, accionamiento mecánico del volante). Durante un ciclo, el gas en el cilindro experimenta diferentes cambios de estado y vuelve al estado inicial. Este proceso se denomina ciclo.

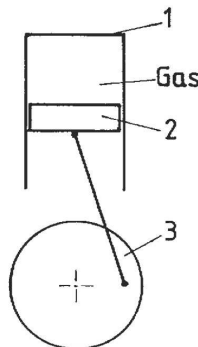


Ilustración 1: Máquina de pistón (1: cilindro, 2: pistón, 3: excéntrica)

Uno de los objetivos del experimento de práctica es comprender, en el manejo con la máquina Stirling, los conceptos de sistema termodinámico, cambio de estado y ciclo. En ello, la máquina se opera como máquina térmica motriz (motor de aire caliente), máquina de refrigeración y bomba de calor.

#### 4.1 Sistema termodinámico, cambio de estado

Se denomina sistema termodinámico, abreviado sistema, un volumen lleno de materia cuyas magnitudes termodinámicas se desean observar. En el caso de la máquina Stirling, es el volumen de gas en el cilindro limitado por el pistón. El límite del sistema se bosqueja en la ilustración 2. A través de este límite, puede aportarse calor ( $+Q$ ) al sistema desde afuera o liberarse calor ( $-Q$ ). En ello se establece por convención que toda energía aportada al sistema se denomina positiva y que toda energía liberada desde el sistema se denomina negativa.

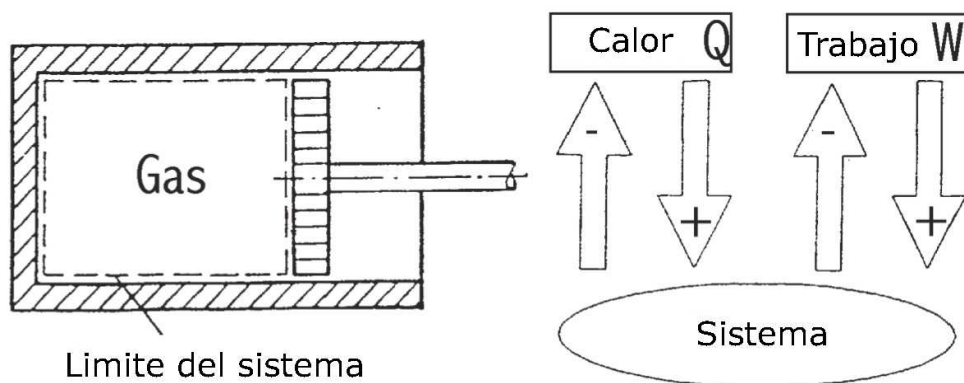


Ilustración 2: Sistemas cerrados y convención de signos para la conversión de calor y trabajo.

Si el gas cambia su volumen contra la presión  $p$  externa, se produce trabajo. En ello, rige la siguiente definición respecto de los signos: el trabajo que realiza el gas (con aumento de volumen) es negativo, vale decir ( $-W$ ). El trabajo ejercido sobre el gas (reducción de volumen) es positivo, vale decir ( $+W$ ). Para el trabajo  $dW$  mediante un cambio de volumen  $dV$  se tiene:

$$dW = -p dV \quad (2)$$

Para expresar el trabajo como función de temperatura y volumen, se elimina  $p$  de la ecuación 2 con ayuda de la ecuación 1. De ello resulta

$$dW = -RT \frac{dV}{V} \quad (3)$$

Por el intercambio de calor con el ambiente y el movimiento del pistón, el estado de un sistema cambia con el tiempo. La descripción del cambio de estado puede simplificarse considerablemente si se observa el cambio de energía en el paso de un estado de equilibrio a otro estado de equilibrio. Del estado inicial al estado final también puede llegarse gradualmente a través de pasos intermedios. Con este método se describen a continuación los procesos termodinámicos en el motor Stirling.

## 4.2 Ciclo de la máquina Stirling

Ahora, explicamos el diagrama de estado del ciclo de operación de la máquina Stirling como máquina térmica motriz (motor de aire caliente) con ayuda de las ilustraciones 3, 4 y 5.

El aire como medio de trabajo gaseoso, se mueve dentro de un volumen cerrado limitado por el pistón de trabajo (1). El pistón desplazador (2) divide el volumen de trabajo en dos áreas. En ello, el gas en el subvolumen sobre el desplazador se mantiene a la temperatura  $T_1$  mediante una fuente de calor (8). En el subvolumen inferior, el gas está en contacto, por la camisa de agua refrigerante (4), con un reservorio térmico de temperatura  $T_2 < T_1$ . El desplazador puede desplazar el gas entre los dos volúmenes de un lado a otro. En ello, el gas de trabajo fluye a través del regenerador (7) con el que puede intercambiar calor.

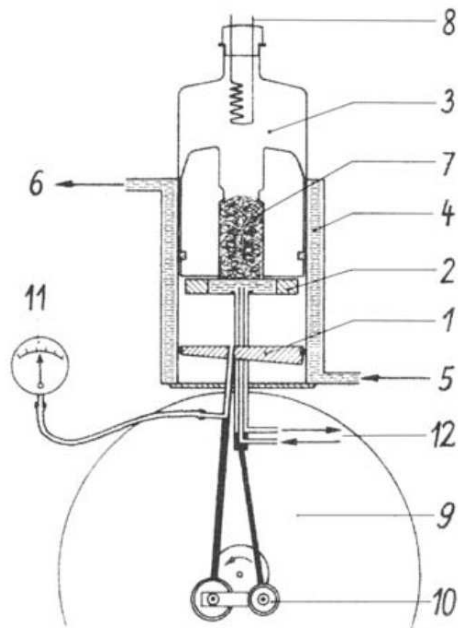


Ilustración 3: Máquina Stirling de Leybold: 1: pistón de trabajo; 2: pistón desplazador; 3: parte superior del cilindro; 4: tubo de camisa de agua refrigerante; 5: entrada de agua refrigerante; 6: salida de agua refrigerante; 7: regenerador (lana de Cu); 8: fuente de calor; 9: volante; 10: varillas de pistón con accionamiento romboidal; 11: manguera con manómetro (presión interior del cilindro); 12. cuplas de entrada y salida del agua refrigerante.

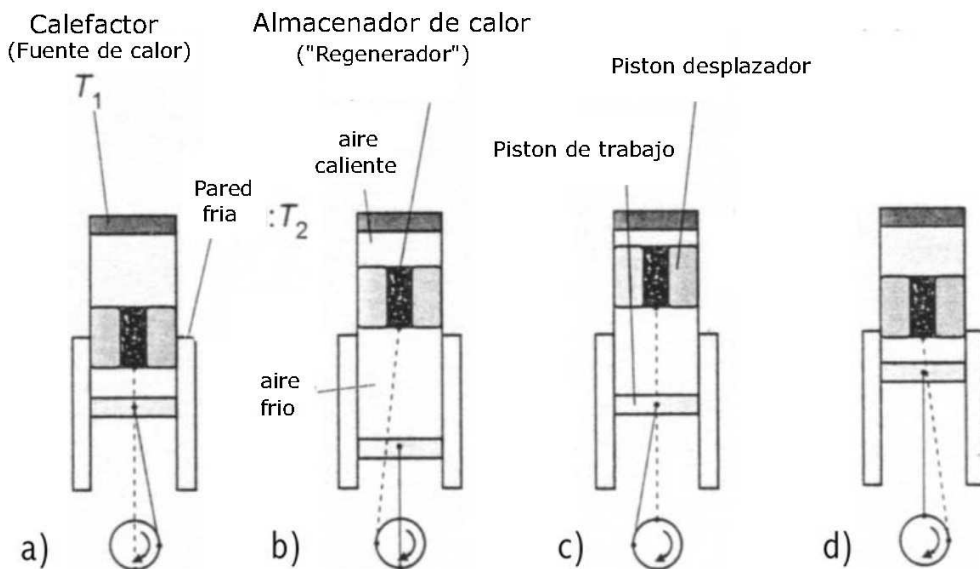


Ilustración 4: posiciones del pistón con a) expansión isotérmica, b) enfriamiento isocórico, c) compresión isotérmica y d) calentamiento isocórico del gas de trabajo.

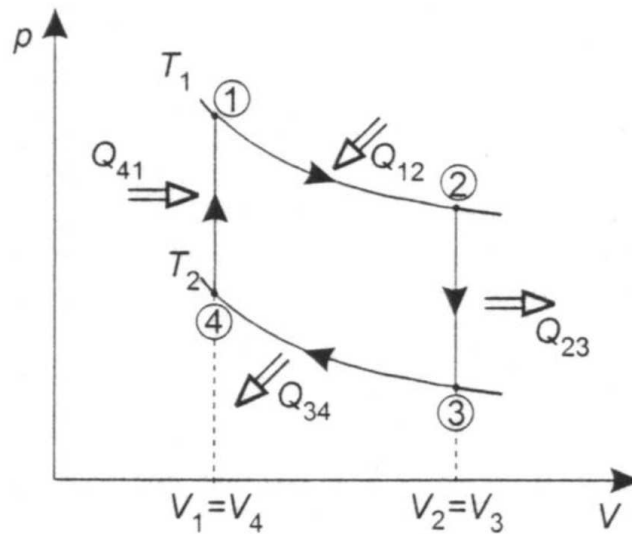


Ilustración 5: diagrama  $p$ - $V$  del motor Stirling

El cambio del volumen de trabajo entre los valores extremos  $V_1$  y  $V_2$  se convierte en un movimiento rotatorio a través de la excéntrica (10). El movimiento del desplazador relativo al pistón de trabajo se conduce mediante un accionamiento romboidal.

Durante una revolución de motor, se desarrolla el siguiente proceso termodinámico ideal representado en la ilustración 5. Comencemos con la fase 1 del proceso, cuando el pistón de trabajo se ubica en el punto de inversión superior ( $V = V_1$ ). Supongamos que el desplazador se encuentra tan cerca del pistón que todo el gas se ubica en la parte "caliente" del cilindro con la temperatura  $T_1$ .

### 1. Expansión isotérmica (1-2):

Al aportar la cantidad de calor  $Q_{12}$ , el gas se expande en forma isotérmica del volumen  $V_1$  al  $V_2$  (ilustración 4a). La presión dentro del cilindro se reduce de acuerdo con la ecuación 1. Dado que con cambios de estado isotérmicos no cambia la energía interna  $U$  del sistema ( $dU = 0$ ), del primer principio de la termodinámica resulta  $dW = -dQ$ , vale decir, el calor aportado se convierte completamente en trabajo mecánico. De la ecuación 3 se obtiene

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} dW = -nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{12} \quad (4)$$



## 2. Enfriamiento isocórico (2-3):

El pistón de trabajo se ubica en el punto de inversión inferior ( $V = V_2 = V_3$ ). Ahora, el desplazador se mueve hacia arriba (ilustración 4b) y el gas caliente fluye a través del regenerador "frío" a la zona enfriada inferior del cilindro. En ello, el gas es enfriado (por el regenerador) de la temperatura  $T_1$  a la temperatura  $T_2$  y reduce su energía interna en  $\delta U_{23} = C_v \cdot (T_2 - T_1)$ . Dado que en cambios de estado isocóricos no se realiza trabajo mecánico ( $W_{23} = 0$ ), se obtiene del primer principio que el calor  $Q_{23} = \delta U_{23} < 0$  se transfiere al regenerador calentándolo y luego vuelve a quedar disponible para el calentamiento isocórico del gas. (Por decirlo así, sin regenerador, el  $Q_{23}$  se "derrocharía" entregándolo al agua refrigerante).

## 3. Compresión isotérmica (3-4):

Mediante el volante, el pistón de trabajo vuelve al punto de inversión superior (ilustración 4c). En ello, el gas en la parte "fría" del cilindro se comprime a temperatura  $T_2$  pasando del volumen  $V_3$  al volumen  $V_4$ . En ello, aumenta la presión del gas de acuerdo con la ecuación 1. El trabajo mecánico realizado por el volante

$$W_{34} = \int_{V_3=V_2}^{V_4=V_1} dW = nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{34} \quad (5)$$

se entrega en este proceso al refrigerante como calor  $Q_{34}$ .

## 4. Calentamiento isocórico (4-1):

El pistón de trabajo se ubica en el punto de inversión superior ( $V = V_4 = V_1$ ). Ahora, el desplazador se mueve hacia abajo (ilustración 4d), y el gas frío fluye a través del regenerador "caliente" a la zona calentada superior del cilindro. En ello, el gas es calentado (por el regenerador) de la temperatura  $T_2$  a la temperatura  $T_1$  y aumenta su energía interna en  $\delta U_{41} = C_v \cdot (T_1 - T_2)$ . El calor requerido para ello  $Q_{41} = \delta U_{41} = -Q_{23}$  es extraído del regenerador y éste vuelve a enfriarse. (Sin regenerador, el  $Q_{41}$  tendría que ser compensado por la fuente de calor).

Al final, se realizó el siguiente trabajo neto:

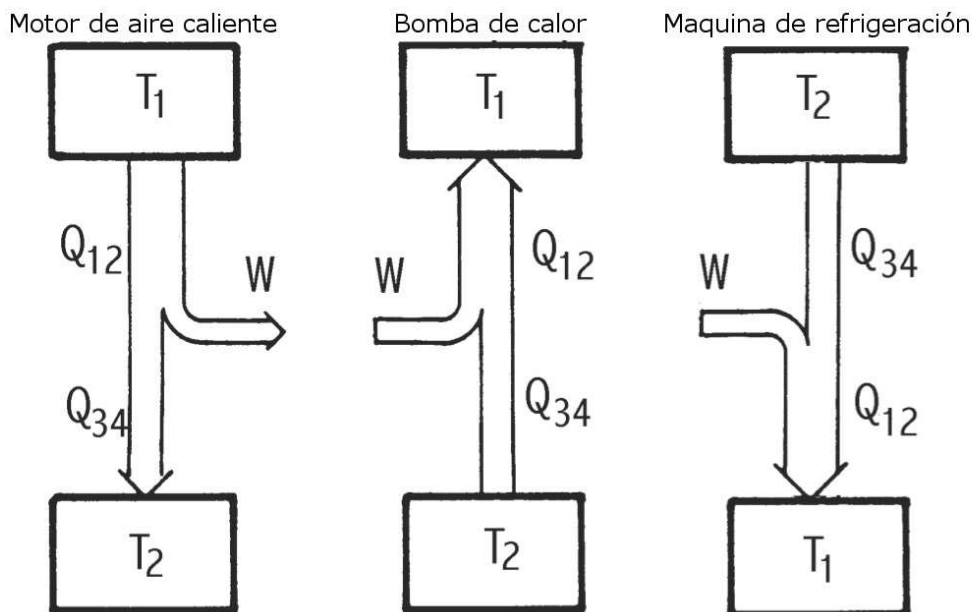
$$W = W_{12} + W_{34} = -nR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} = -\oint p dV \quad (6)$$

Gráficamente, este trabajo corresponde al área encerrada por las dos líneas isocóricas e isotérmicas de la ilustración 5. La eficiencia térmica ideal de este proceso Stirling está definido por la relación entre la energía convertida, con una revolución, en trabajo mecánico  $\oint p dV$  y el total de la energía térmica invertida, vale decir,  $Q_{12}$ . Si se consideran las ecuaciones 4 y 6, resulta

$$\eta_{th} = \frac{\oint p dV}{Q_{12}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1 \quad (7)$$

En términos muy generales, para el trabajo neto de ciclos rige lo siguiente: si la curva es recorrida en sentido horario (máquina térmica motriz), el sistema entrega trabajo ( $W < 0$ ). En el sentido contrario (máquina de refrigeración o bomba de calor), se absorbe trabajo ( $W > 0$ ).

## Cabezal del cilindro



Agua refrigerante

Ilustración 6: Transformación de energía en máquinas térmicas motrices y motrices térmicas

La ilustración 6 muestra esquemáticamente el proceso de conversión de energía en el motor de prueba, pero también rige en general para

*procesos en sentido horario*: conversión de energía térmica en energía mecánica

*procesos en sentido antihorario*: conversión de energía mecánica en energía térmica

### 4.3 Conversión de energía y eficiencia efectiva del motor de aire caliente

Por radiación térmica, convección y fricción, se producen pérdidas en el motor Stirling "real" que reducen la eficiencia termodinámica ideal  $\eta_{th}$ . La ilustración 7 muestra el proceso completo de la conversión de la potencia térmica eléctrica en potencia mecánicamente disponible del motor Stirling, resultando las siguientes potencias y eficiencias parciales con la frecuencia de revoluciones del motor dada  $f$ :

Potencia térmica eléctrica	$P_{QH} = U I$	
Potencia térmica absorbida por el gas de trabajo	$P'_{QH} = \eta_{wv} P_{QH} = f Q_{12}$	$\eta_{wv}$ : Pérdidas de calor al ambiente
Potencia mecánica aportada por el gas de trabajo	$P_W = \eta_{th} P'_{QH} = f \oint p dV$	$\eta_{th}$ : Eficiencia termodinámica
Potencia mecánica obtenible en el eje del motor	$P_E = \eta_{mech} P_W$	$\eta_{mech}$ : Pérdidas mecánicas de fricción (pistón, rodamiento)

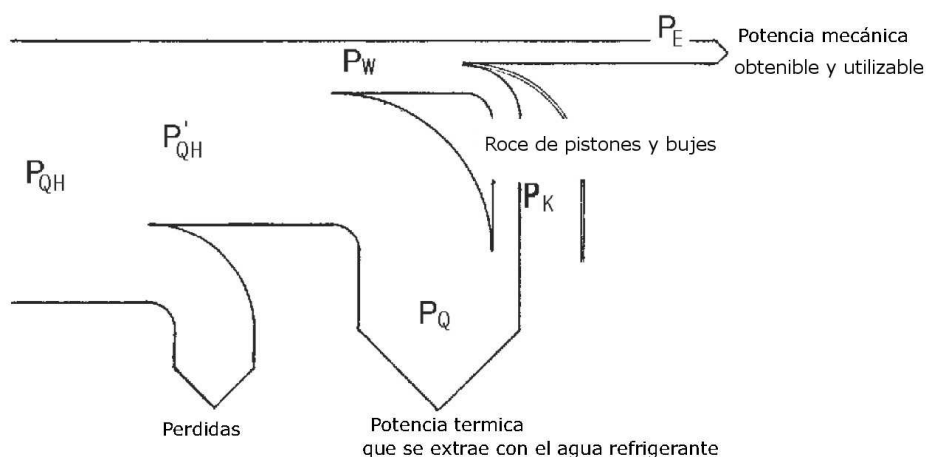


Ilustración 7: Diagrama de flujo de energía con pérdidas en el motor Stirling "real"

Lo que realmente importa para el empleo técnico del motor es qué parte de la potencia térmica eléctrica aplicada  $P_{QH}$  puede convertirse finalmente en potencia mecánica obtenible y utilizable  $P_E$ . Así, resulta la siguiente eficiencia efectiva del motor de aire caliente

$$\eta_{eff} = \frac{P_E}{P_{QH}} = \eta_{mech} \eta_{th} \eta_{wv} \quad (8)$$

Para el cálculo de las eficiencias parciales, pueden medirse en el experimento la potencia térmica eléctrica  $P_{QH}$ , la frecuencia de revoluciones del motor  $f$  (capítulo 5.5) y la potencia mecánica  $P_E$  (capítulo 5.7). Los respectivos diagramas  $pV$  también permiten determinar (por integración) la potencia  $P_w$  entregada por el gas de trabajo y  $Q_{12}$ .

Además, de la ilustración 7 se obtienen experimentalmente las siguientes potencias:

- La potencia térmica extraída del agua refrigerante:  $P_Q = c_w \rho_w \Phi_w \Delta T_w$  (calor específico del agua:  $c_w$ , densidad del agua:  $\rho_w$ , flujo de agua refrigerante:  $\Phi_w = \Delta V / \Delta t$ , diferencia de temperatura del agua refrigerante de entrada y de salida:  $\Delta T_w$ ).
- La potencia térmica entregada al agua refrigerante por fricción del pistón:  $P_K = f W_K$ , en que  $W_K$  es el trabajo de fricción por ciclo que debe determinarse en el ejercicio 1d.

#### 4. 4 El motor Stirling como máquina de refrigeración y bomba de calor

Hasta ahora, el motor Stirling se representó como máquina térmica motriz: por el flujo de energía térmica de un reservorio caliente a uno frío, se generó trabajo mecánico. En cambio, si se aporta trabajo mecánico accionando la máquina desde afuera, se genera a la inversa un flujo de calor del reservorio de menor temperatura al de mayor temperatura. Ahora, si el reservorio de mayor temperatura se mantiene a temperatura ambiente, puede enfriarse así el otro reservorio, con lo que se obtiene una máquina de refrigeración. En cambio, si el reservorio de menor temperatura se encuentra a temperatura

ambiente, el otro reservorio se calienta, con lo que se obtiene una bomba de calor.

En ambos casos, el diagrama  $pV$  - a diferencia del motor de aire caliente - se desarrollará en sentido antihorario. Vale decir, la expansión isotérmica se produce a la temperatura inferior  $T_2$ . La energía térmica necesaria para ello se extrae del reservorio más frío y se libera en la compresión a la temperatura superior  $T_1$  (véase ilustración 6).

Para estos tipos de operación también pueden definirse eficiencias termodinámicas. En ambos casos se compara la energía útil con el trabajo mecánico  $W = \oint p dV$  entregado al proceso. Así, se obtiene para la máquina de refrigeración la eficiencia

$$\eta_{th}^K = \frac{Q_{34}}{\oint p dV} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} > 1 \quad (9)$$

y para la bomba de calor, la eficiencia

$$\eta_{th}^W = \frac{Q_{34}}{\oint p dV} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} > 1 \quad (10)$$

Las eficiencias efectivas de estas máquinas resultan, de manera análoga al motor de aire caliente, de la potencia refrigerante o térmica medible  $P_{K/W}$  relativa a la potencia consumida para el accionamiento de la máquina  $P_{motor} = UI$

$$\eta_{eff}^{K/W} = \frac{P_{K/W}}{P_{Motor}} \quad (11)$$

## 5 Montaje experimental

### 5.1 Máquina Stirling de la empresa Leybold

La ilustración 3 muestra esquemáticamente la configuración de la máquina Stirling de la empresa Leybold. El cilindro (3) y el tubo de la camisa de agua refrigerante (4) son de vidrio. Ello permite observar directamente todos los pasos del proceso Stirling.

NOTA:

- **Las piezas de vidrio del motor de aire caliente no deben someterse a cargas térmicas excesivas. Por ello debe procurarse que el flujo de agua refrigerante sea suficiente.**
- **Nunca caliente el motor detenido por más que pocos segundos.**

## 5.2 Sistema de agua refrigerante

La parte inferior del cilindro es de doble pared y por ella fluye agua refrigerante de un recipiente de reserva de 15l. El flujo se asegura mediante una bomba de inmersión de 9V que se encuentra en dicho recipiente. En la entrada (5) y en la salida (6) del agua refrigerante de la máquina Stirling puede leerse la temperatura de entrada y de salida del agua refrigerante.

NOTA:

- **La temperatura del agua refrigerante de entrada no debe exceder los 30° C.**
- **El flujo mínimo corresponde a 100ml/min.**

## 5.3 Accesorios del cilindro

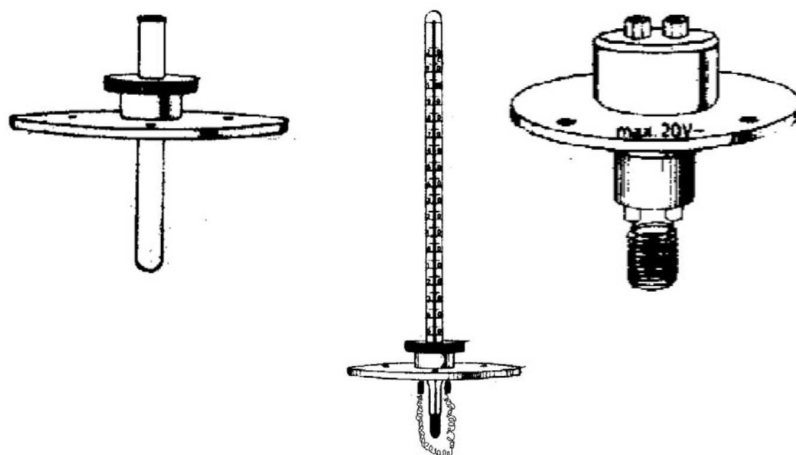


Ilustración 8: Accesorios del cilindro, de izquierda a derecha: inserto de brida con rosca sellada para el tubo de ensayo con líquido para realizar el ejercicio 2; inserto de brida con termómetro y espiral de calefacción para determinar la potencia refrigerante (ejercicio 3);

inserto de brida con doble espiral de calefacción ( $1\Omega$ ) para el accionamiento del motor de aire caliente (ejercicio 4).

Para los diversos tipos de operación como motor de aire caliente, máquina de refrigeración y bomba de calor, existen tres diferentes accesorios del cilindro (véase ilustración 8). Estas pueden removerse fácilmente mediante tres tuercas mariposa y cambiarse.

NOTA:

- El tubo de ensayo debe estar firme en la juntura a presión (por la sobrepresión). El apriete no debe efectuarse sobre la cabeza del cilindro, dado que el tubo de ensayo puede quebrarse.
- Al atornillar los diversos accesorios, debe procurarse que éstos no estén nunca en contacto con el pistón desplazador.
- Al operar el motor, la cabeza del cilindro puede calentarse mucho; por eso, debe colocarse la rejilla protectora y esperarse eventualmente algunos minutos hasta que se enfríe antes de cambiar el accesorio.

#### **5.4 Transformador para la alimentación de los espirales de calefacción en el motor de aire caliente**

Para alimentar el sistema de calefacción del motor de aire caliente, se dispone de un transformador para experimentos en el que pueden ajustarse a elección tensiones alternas entre 0V y 20V (ilustración 9). Para medir la potencia eléctrica  $P_{QH} = UI$ , se dispone de dos multitester digitales. Mida la caída de potencial directamente en los contactos del espiral de calefacción, dado que las resistencias de los contactos y las resistencias propias de los cables de alimentación no son despreciables.

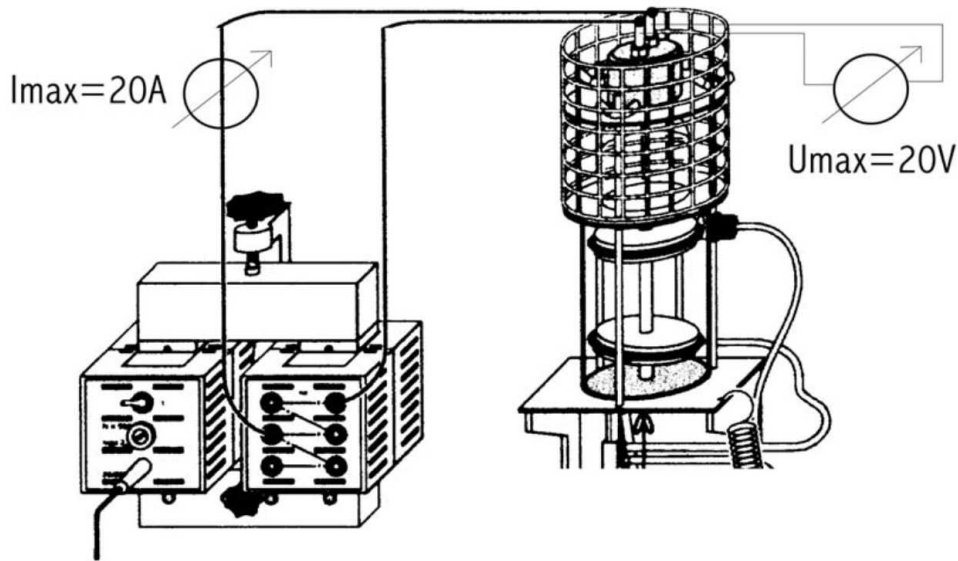


Ilustración 9: Conexión del transformador para experimentos al espiral de calefacción.

NOTA:

- Dado que en la realización del experimento pueden fluir corrientes de hasta 18A, emplee para la medición de la corriente un multitester con una corriente máxima de 20A (o un alicate para corriente). Cuidado: los cables de corriente y los enchufes pueden llegar a calentarse mucho.

### 5.5 Medición de $pV$ registrada por computador con el adaptador CASSY (véase manual GP para experimentos mediante computador)

El ciclo Stirling ideal que se muestra en la ilustración 5, sólo se produce de manera aproximada con la máquina Stirling aquí empleada. Durante los procesos isocóricos 2-3 y 4-1, el pistón de trabajo no está detenido, sino que desarrolla un movimiento armónico en el tiempo. Si el motor marcha con  $f$  revoluciones por segundo, el volumen fluctúa periódicamente entre los valores extremos  $V_1$  y  $V_2$  (véase ilustración 10, lado derecho). El movimiento del desplazador también es armónico. Puede demostrarse que el ciclo se desarrolla óptimamente cuando la posición del desplazador presenta un desfase de  $90^\circ$  en relación con el pistón. La ilustración 10 (lado izquierdo) muestra un diagrama  $pV$  efectivamente medido.



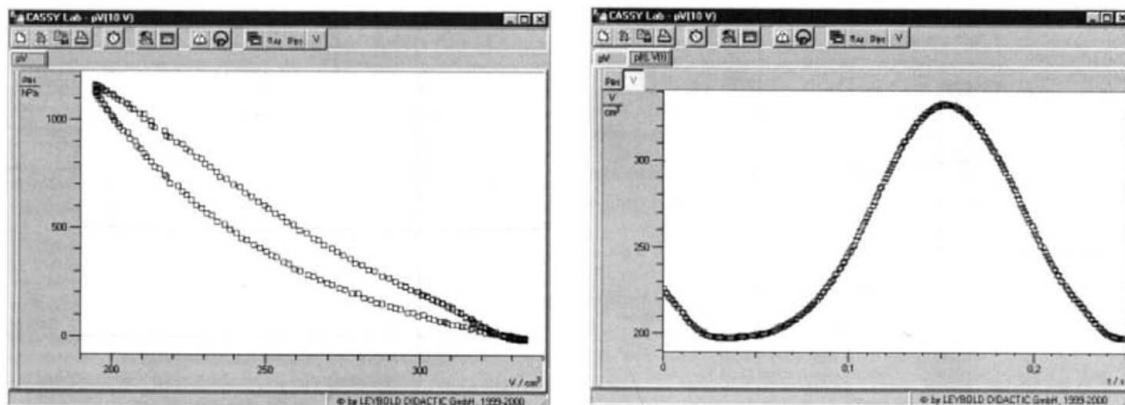


Ilustración 10: Detalle CASSY: Diagrama  $pV$  (izquierdo); diagrama  $V(t)$  (derecho).

La posición del pistón de trabajo se transmite mediante una cuerda a un medidor de trayecto (véase ilustración 14). Al moverse el pistón, cambia el volumen del cilindro en total en  $(140 \pm 0,5)$  cm<sup>3</sup>. El interior del cilindro está unido con el manómetro mediante una manguera. La presión  $p$  y el volumen  $V$  pueden registrarse en intervalos de milisegundos en el computador con el adaptador CASSY y el software correspondiente. El software está diseñado de modo tal que durante la realización del ensayo pueden indicarse a elección diagramas  $p(t)$ ,  $V(t)$  y  $p(V)$ . (véase ilustración 10). Además, a través de la indicación del espectro de frecuencia de  $V(t)$  puede leerse el número aproximado de revoluciones del motor en marcha (sin ilustración).

La base de datos completa ( $p$ ,  $V$ ,  $t$ ) de una medición puede convertirse a y guardarse en formato ASCII para su utilización posterior. Para integrar los diagramas  $pV$ , se dispone del software apropiado (ORIGIN) en el computador de medición. Para determinar el número exacto de revoluciones del motor, se emplea el tiempo  $\Delta t$  para varios ciclos de motor  $N$  en la representación  $V(t)$ :  $f = N/\Delta t$ .

## 5.6 Motor eléctrico para accionar la máquina de refrigeración o bomba de calor

El volante de la máquina Stirling puede accionarse con un motor eléctrico a través de una correa de goma (véase ilustración 12). En el equipo de alimentación correspondiente puede ajustarse y leerse la tensión  $U$  aplicada al motor eléctrico o la corriente  $I$  utilizada. La potencia utilizada por el motor es entonces  $P_{motor} = UI$ . El sentido de la revolución del motor puede cambiarse por inversión de la polaridad.

NOTA:

- No opere el motor eléctrico con más de 13.2V.
- Si el motor eléctrico no arrancara, debe activarse levemente en forma manual.

### 5.7 Freno Prony para la medición de la potencia mecánica

La potencia mecánica que se tiene en el eje (árbol) del motor, se mide con el freno Prony (freno dinamométrico) (ilustración 11). Éste se compone de dos zapatas de freno (2) que con una fuerza determinada (regulable con pernos (3)) ejercen presión sobre el eje con diámetro  $d = 25\text{mm}$ . La fuerza de fricción que se origina en ello produce un torque en las zapatas de freno. Su magnitud se determina midiendo (con pesos (4) y balanza de resorte (5)) la fuerza  $G$  que, con una separación de  $l = 25\text{cm}$  del eje, mantiene el eje del brazo de palanca en posición de equilibrio horizontal. La fuerza de fricción puede modificarse apretando las tuercas mariposa con más o menos fuerza. Cuando el eje gira con  $f$  revoluciones por segundo, la potencia entregada por el motor en estado de equilibrio es

$$P_E = 2\pi f G l \quad (12)$$

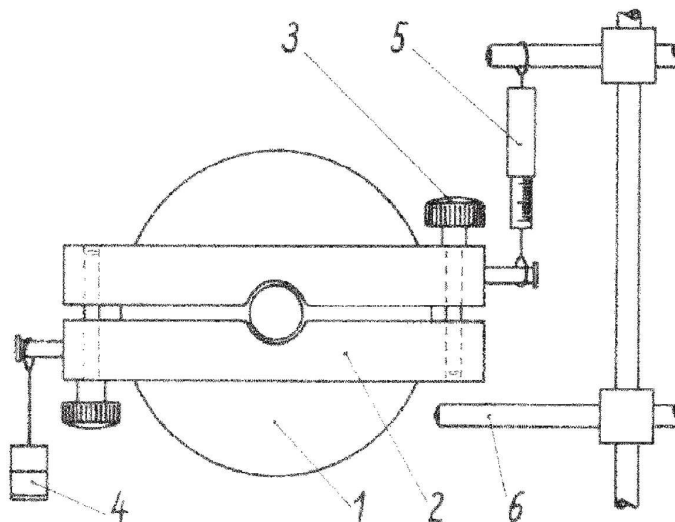


Ilustración 11: Configuración de un freno Prony: (1) volante, (2) zapatas de freno, (3) pernos de regulación, (4) pesos de compensación (opcional), (5) balanza de resorte, (6) soporte universal

Al emplear los pesos de compensación, debe restarse la respectiva fuerza de peso  $F_G = m g$  de la fuerza de reacción  $G$ .

NOTA:

- Procure que el motor no se detenga con una carga alta. Si se detiene, debe desconectarse la fuente de calor de inmediato.
- Para asegurar el freno en el eje, debe emplearse el disco con agujeros que se acompaña.

### **5.8 Otros accesorios**

- Pincel y aceite de silicona para lubricar la pared interna del pistón
- 1 probeta y un cronómetro para medir el flujo del agua refrigerante
- diversos cables para la conducción de corriente
- tubos de ensayo de repuesto, balanza y termómetro para el ejercicio 2
- Aparato de alimentación para la calefacción de compensación para el ejercicio 3

### **5.9 Indicaciones generales de seguridad**

#### **Importante:**

El manejo correcto que se explica en la instrucción de uso es un requisito para el buen funcionamiento del motor de aire caliente. Lea con detención la instrucción de uso y considere especialmente las siguientes indicaciones:

1. Tome el motor de aire caliente al transportarlo de la base doble T (ni del cilindro ni del varillaje).
2. Quite o guarde el inserto de brida con espiral calefactor sólo con el tubo protector puesto, para evitar un daño mecánico de los espirales (por ejemplo, pueden doblarse al aplastarlos sobre una superficie).

3. Asegure una buena lubricación de la pared interna del cilindro con aceite de silicona (388 21) (véase párrafo 2).
4. Compruebe que el agua refrigerante circule bien, que su cantidad sea la necesaria (mínimo 100ml/min, máximo 500ml/min) y que su temperatura sea la correcta (máximo temperatura ambiente).
5. Coloque el espiral calefactor o el termómetro o el tubo de ensayo de manera tal que no tengan contacto con ninguna parte del pistón desplazador.
6. Sujete firmemente el termómetro o el tubo de ensayo con la tuerca moleteada en el inserto de brida, dado que en el cilindro hay sobrepresión.
7. Antes de cada puesta en marcha del motor, gire el volante con la mano y compruebe si el pistón y el desplazador se mueven libremente.
8. Antes de conectar la corriente de calefacción, lleve el pistón del desplazador al punto muerto inferior. Accione la calefacción sólo por poco tiempo - con plena calefacción, sólo 3s - sin el motor en marcha. Luego, ponga en marcha el motor accionando el volante (tome en cuenta el sentido del giro).  
Si el motor no arranca, interrumpa de inmediato la corriente de calefacción, revise si la configuración es la correcta (compruebe especialmente si el pistón se mueve libremente sin tocar los espirales de calefacción) e intente poner nuevamente en marcha el motor.
9. Cuidado - nota importante: no deje de controlar el motor con el indicador mientras esté en marcha. Si se suelta la unión de manguera entre el motor y el indicador, el motor se detiene. En ese caso, debe desconectarse la calefacción de inmediato.

## **6. Realización del experimento**

Para evitar daños o lesiones, es estrictamente necesario que Ud. se familiarice bien con estas instrucciones, especialmente con las indicaciones generales de seguridad (capítulo 5.9) antes de realizar el experimento. En caso de dudas o preguntas, diríjase siempre a la persona encargada. Maneje la máquina con cuidado.

## Primer ejercicio: preparativos

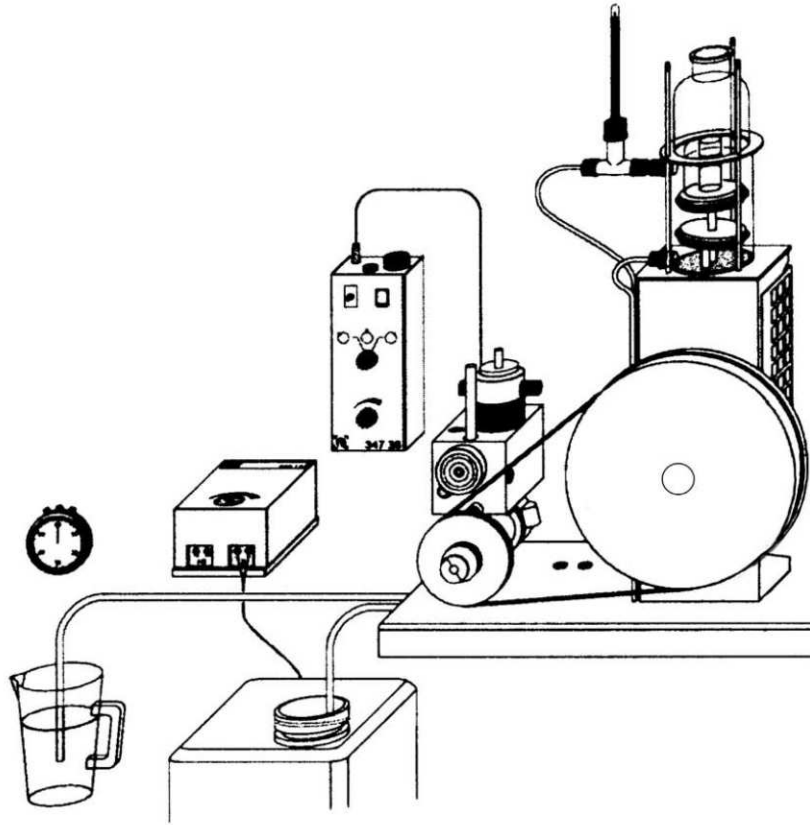


Ilustración 12: Accesorios para el ejercicio 1: máquina Stirling, aceite de silicona con pincel (u otro), probeta, cronómetro, reservorio de agua refrigerante con bomba de inmersión y equipo de alimentación, motor eléctrico con equipo de alimentación y correa de accionamiento, termómetro en la entrada y en la salida del agua refrigerante, registrador de trayecto con CASSY y software (u otro).

En particular, deben realizarse los siguientes preparativos:

### (a) *Lubricación de la pared interna del cilindro*

Antes de cada puesta en marcha, debe lubricarse la pared interna del cilindro en el pistón desplazador y el pistón de trabajo con aceite de silicona. Con el pistón de trabajo en posición alta, se lubrica con un pincel a través de la perforación en la placa base (eventualmente, debe sacarse la rejilla protectora) o con el pistón de trabajo en posición baja, a través de la abertura en la cabeza del cilindro (eventualmente, debe sacarse el accesorio del cilindro).

*(b) Revisión de la circulación del agua refrigerante y medición del flujo*

Para hacer circular el líquido refrigerante, se emplea una bomba de inmersión (tensión de alimentación máxima de 9V) para líquidos. En ello, debe fijarse en la temperatura del agua refrigerante. El agua demasiado caliente reduce la potencia del motor y representa un peligro para éste. **Si durante la operación del motor la temperatura de entrada aumenta a más de 30 grados, debe recurrirse de inmediato al encargado; eventualmente, debe reemplazarse el agua refrigerante en el reservorio por agua fría de la llave.**

Con ayuda de una probeta y un cronómetro, mida el flujo de agua refrigerante  $\Phi = \Delta V/\Delta t$ , midiendo el tiempo de bombeo  $\Delta t$  necesario para llenar un  $\Delta V = 1l$  de la probeta con agua refrigerante proveniente de la manguera de devolución.

**El flujo debería fluctuar entre 100 y 500ml/min**

*(c) Conexión y prueba de funcionamiento del adaptador CASSY para la medición de pV*

- Conecte el adaptador CASSY e inicie el software correspondiente.
- Revise la conexión del medidor de trayecto (véase ilustración 14). La cuerda no debe resbalar en el potenciómetro.
- Revise la conexión del manómetro. Elimine eventualmente el tapón de agua condensada en la manguera de unión del manómetro, soltando la manguera en el manómetro y accionando el motor manualmente bajo compresión haciéndolo girar algunas veces. (Repita el procedimiento si hasta la tarde volvieren a formarse tapones de agua condensada).
- Familiarícese con el software con ayuda del encargado y compruebe su funcionamiento.

*(d) Cálculo de las pérdidas por fricción del motor de aire caliente*

Deje abierta la tapa del cilindro y conecte el motor eléctrico para accionar la máquina Stirling (ilustración 12). Mida las temperaturas  $T_{EIN}$  y  $T_{AUS}$  en la entrada y en la salida del agua refrigerante. Accione el volante con el motor eléctrico (tensión de alimentación: 13.2V) (el sentido no importa) y mida cada 60s el aumento de la temperatura del agua refrigerante ( $\Delta T_W = T_{Aus} - T_{Ein}$ ) hasta que ésta se mantenga constante. Determine la frecuencia de revoluciones  $f$  del

motor empleando los datos CASSY del medidor de trayecto (véase capítulo 5.5).

Calcule la potencia de fricción  $P_K = \rho_w \Phi c_w \Delta T_w$  entregada por la fricción del pistón al agua refrigerante, y con ésta el trabajo de fricción por ciclo  $W_K = P_K / f$ . (Densidad  $\rho_w = 1\text{g/cm}^3$ , calor específico  $c_w = 4.18\text{J/(gK)}$ ).

### Ejercicio 2: Accione la máquina Stirling como bomba de calor

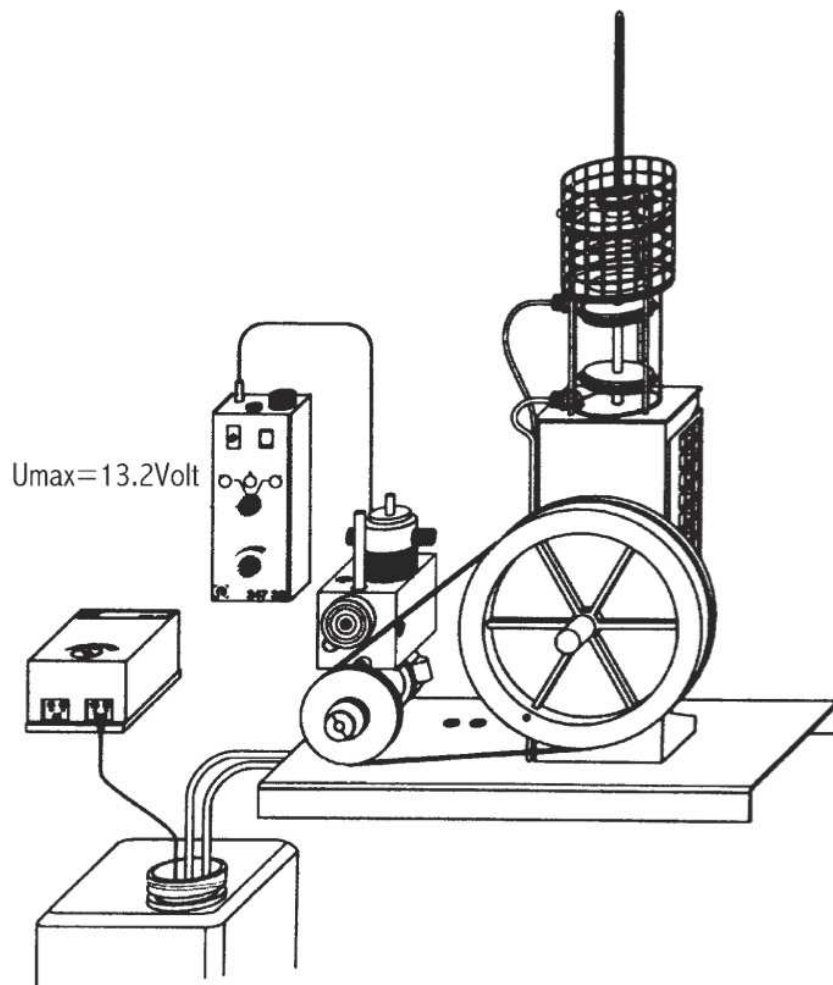


Ilustración 13: Configuración de la bomba de calor y la máquina de refrigeración

Caliente así una muestra de agua (hasta unos  $65^\circ\text{C}$ ). Determine la eficiencia termodinámica y efectiva de esta bomba de agua.

En la ilustración 13 se muestra el montaje de experimento. Junte el accesorio del cilindro con el tubo de ensayo. **Procure que el tubo de ensayo quede fijo en la junta a presión y que no toque el pistón desplazador.** Pese aprox.  $m = 2g$  de agua con una balanza en el tubo de ensayo, sujete los accesorios sobre la cabeza del cilindro y fije en ellos un termómetro con un trozo de esponja. El motor eléctrico se acciona girando el volante de la máquina Stirling con  $f \approx 3\text{Hz}$ . Antes de la conexión, determine el sentido de giro con el encargado.

Luego de conectar la máquina, mida la temperatura de la muestra de agua en intervalos de unos 20s. Al realizar el ejercicio, represente gráficamente el desarrollo de la temperatura  $T(t)$ . Con la zona lineal del desarrollo de la temperatura, determine la potencia calórica  $P_w = m_w c_w \frac{dT}{dt}$  entregada al agua.

Mida el consumo de potencia  $P_{motor} = UI$  del motor eléctrico necesario para accionar la máquina. Genere un diagrama  $pV$  al término del experimento y calcule la diferencia de temperatura  $\Delta T_w$  entre la entrada y la salida del agua refrigerante.

Sobre la base del diagrama  $pV$ , calcule la eficiencia termodinámica  $\eta_{th}^w$  de la máquina y compárela con la eficiencia efectiva  $\eta_{eff}^w$ . Analice si la diferencia de temperatura  $\Delta T_w$  medida del agua refrigerante tiene sentido (nota: debe tomarse en cuenta la fricción del pistón).

### **Ejercicio 3: Accionamiento del motor Stirling como máquina de refrigeración**

Emplee la máquina Stirling como máquina de refrigeración. El montaje del experimento es similar al del ejercicio 2. Reemplace el tubo de ensayo por el accesorio con termómetro y espiral calefactor. Para ello, desatornille todos los accesorios. **Al volver a atornillar los accesorios, procure que el espiral calefactor no tenga contacto con el pistón desplazador.** Conecte el espiral calefactor al equipo de alimentación de corriente continua, de modo que pueda determinarse la potencia calórica con dos multitester digitales (similar a la ilustración 9). El motor eléctrico debe ponerse en marcha de modo tal que el volante gire en sentido horario ( $f \approx 3\text{Hz}$ ).

Luego de poner en marcha el motor, la temperatura indicada en el termómetro cae rápidamente. Compense la potencia refrigerante de la máquina de refrigeración aumentando cuidadosamente la tensión de calefacción (máx. 10 Volt), de manera que la temperatura indicada por el termómetro se mantenga



en aprox.  $15^{\circ}\text{C}$ . Mida la potencia calórica eléctrica  $P_K = UI$  requerida para ello. Mida el consumo de potencia  $P_{motor} = UI$  del motor eléctrico requerido para el accionamiento del motor. Al término del experimento, genere un diagrama  $pV$  y calcule la diferencia de temperatura  $\Delta T_W$  entre la entrada y la salida del agua refrigerante.

Sobre la base del diagrama  $pV$ , calcule la eficiencia termodinámica  $\eta_{th}^K$  de la máquina y compárela con la eficiencia efectiva  $\eta_{eff}^K$ . Analice si la diferencia de temperatura  $\Delta T_W$  medida del agua refrigerante tiene sentido (nota: debe tomarse en cuenta la fricción del pistón).

#### **Ejercicio 4: Accionamiento del motor Stirling como máquina térmica motriz**

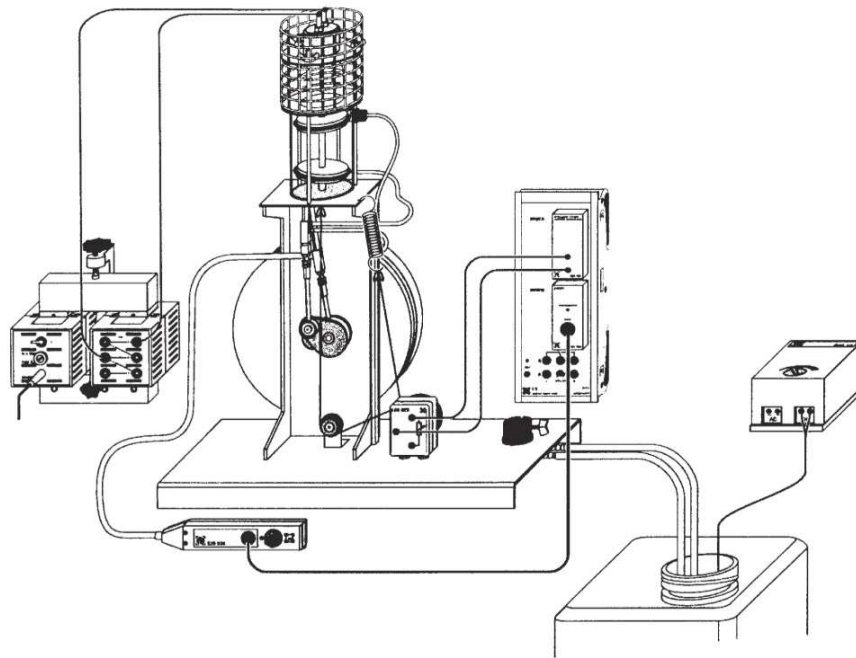


Ilustración 14: Configuración de una máquina térmica motriz

##### *(a) Puesta en marcha del motor de aire caliente*

La ilustración 14 muestra el montaje de experimento. Atornille el accesorio del cilindro con el doble espiral calefactor. **Es estrictamente necesario colocar la rejilla protectora sobre la cabeza del cilindro.** Conecte el

transformador de experimento al espiral calefactor de modo tal que pueda medir la absorción de potencia eléctrica del espiral calefactor con dos multitester (véase capítulo 5.4).

Ponga en marcha el motor con una tensión de calefacción de 12V junto con el encargado del siguiente modo: luego de conectar la calefacción, espere hasta que se torne incandescente de color rojo oscuro. Luego, accione el volante. Repita el accionamiento hasta que el motor marche solo. **Considere que el motor sólo debe estar detenido algunos segundos con la calefacción conectada.** Cuando el motor marche en forma estable, reduzca la tensión de calefacción al valor mínimo en que pueda marchar el motor. Luego de cada modificación de la tensión de calefacción, el motor necesita algunos minutos de marcha hasta quedar estacionario, vale decir, hasta lograr un número constante de revoluciones y un aumento constante de la temperatura  $\Delta T_w$  del agua refrigerante.

(b) *El motor Stirling en marcha sin carga*

Con la tensión de calefacción dada, mida **en el estado estacionario** la potencia térmica eléctrica  $P_{QH}$  consumida por el espiral calefactor y el aumento de la temperatura  $\Delta T_w$  del agua refrigerante, y genere un diagrama  $pV$ . Aumente la tensión térmica en el transformador en intervalos de 2V hasta 16V y repita las respectivas mediciones.

Con los valores de medición, determine para cada tensión de calefacción las potencias  $P_{QH}$ ,  $P'_{QH}$ ,  $P_w$ ,  $P_Q$  y  $P_K$  al igual que la frecuencia de revoluciones  $f$  del motor. A partir de éstas calcule las respectivas eficiencias  $\eta_{ww}$  y  $\eta_{th}$ . Suponiendo que la temperatura  $T_2$  en la parte inferior del cilindro corresponde a la temperatura de salida del agua refrigerante, estime la temperatura  $T_1$  en la parte superior del cilindro (ecuación 7). Anote los resultados en una tabla.

Grafique el número de revoluciones  $f$  y la eficiencia termodinámica  $\eta_{th}$  en función de la potencia térmica  $P_{QH}$  y fundamente el desarrollo.

(c) *El motor Stirling con carga*

Primero, reduzca la tensión de calefacción de modo que el motor marche lento. Revise la temperatura del agua refrigerante en el reservorio y eventualmente reemplace el agua por agua fresca.

Con el motor en marcha lenta, ajuste el freno Prony (véase capítulo 5.7), sin ejercer un torque sobre el eje del motor. Elija una tensión de calefacción con la que el motor sin carga ( $G = 0N$ ) marche con aprox.  $f = 5 - 6\text{Hz}$ .

Con la carga dada, mida la fuerza  $G$  en la balanza de resorte, la potencia eléctrica consumida por el espiral calefactor  $P_{QH}$ , el aumento de la temperatura  $\Delta T_W$  del agua refrigerante y genere un diagrama  $pV$ . Apretando los tornillos mariposa en el freno, aumente la carga del motor en intervalos de aprox.  $\Delta G = 0.2N$  hasta la carga máxima, y repita las respectivas mediciones. **La máquina no debe llegar a detenerse por carga alta. En caso de detención, debe de inmediato volver a accionarse en forma manual o desconectarse la calefacción eléctrica.**

Al término de la medición, reduzca la carga del motor a cero, deje que el motor termine la marcha durante un minuto con una baja tensión de calefacción y al final desconecte la calefacción completamente. Luego de algunos minutos más puede desconectarse el agua refrigerante.

Anote los resultados de la medición en una tabla, tal como en el ejercicio 4b. Indique también la potencia mecánica  $P_E$  medida y las eficiencias  $\eta_{mech}$  y  $\eta_{eff}$ .

Grafique la potencia mecánica  $P_E$  medida y la eficiencia efectiva  $\eta_{eff}$  en función del número de revoluciones  $f$  y discuta el desarrollo.

---

Esta guía fue recopilada a base de publicaciones de la empresa Leybold-Didactic, de la Universidad de Saarbrücken (Manfred Deicher y Patrick Huber), de literatura mencionada en capítulo 2, y la adaptación técnica de Ana Karola Rihm Jacob.