

TEMAS DE FÍSICA

FÍSICA DE LOS ARTEFACTOS DOMÉSTICOS: EL CALEFÓN

LORENZO MARCOS IPARRAGUIRRE

Facultad de Matemática Astronomía y Física. Universidad Nacional de Córdoba.
Haya de la Torre y Medina Allende. Ciudad Universitaria. CP 5000. Córdoba. Argentina
T.E. 051-334051/52/55. Fax: 051-334054.

RESUMEN

Se plantea un típico problema de lápiz y papel, adecuado para la enseñanza de la Física en el nivel medio, referido al cálculo de potencias, energías, caudales, etc. en el funcionamiento de un calefón doméstico común. Se resuelve el problema, y a partir de la discusión de los resultados, se obtienen argumentos para apoyar la idea de que este tipo de problemas debe ser planteado acompañado de las correspondientes actividades experimentales. Se plantea una actividad experimental acorde con esta idea, se analiza su desarrollo, y se desarrollan también algunos detalles técnicos útiles para un docente que quiera transferirla a la realidad de su propia aula.

ABSTRACT

A typical "pencil and paper" problem, suitable for the teaching of Physics at secondary level is stated. The problem refers to the calculations of power, energy, volume flow, etc., in the functioning of a domestic water heater. The problem is solved, and from the discussion of the outcomes, arguments arise supporting the idea that this kind of problem must be stated side by side with the corresponding experimental activity. The suitable experimental activity is stated, its development is analyzed, and some technical details are developed. This information is useful for a teacher who wants to transfer the activity to the reality of his classroom.

INTRODUCCIÓN

Los aires de renovación traídos por la Reforma Educativa han llamado la atención (una vez más, porque no es en realidad algo nuevo) sobre la conveniencia de desarrollar en el aula los temas de ciencia relacionados directamente con los artefactos y fenómenos de la vida cotidiana.

Entre los artefactos o aparatos que son de especial interés, por sus aplicaciones y por los

conceptos que involucran, están los que sirven para calentar cosas, y mejor si utilizan la circulación de fluidos. Los que dependen de la quema de algún combustible, tienen el interés adicional de que esto permite establecer relaciones con la Química. Estas relaciones, aunque simples, resultan en general incómodas para muchos profesores de Física, que deben ejercitarse en ellas para poder brindar un panorama más integrado del área a sus alumnos.

En general para la enseñanza de la Física conforme a estas ideas se plantean dificultades que es necesario superar. El esfuerzo por superar estas dificultades es siempre muy instructivo, y aquí se lo desarrolla casi exhaustivamente para un caso: el funcionamiento de un calefón.

Comenzaremos con un problema simple de lápiz y papel, y veremos cómo la discusión de sus detalles nos lleva gradualmente al planteo de actividades experimentales de interés para ser desarrolladas en el nivel medio.

PROBLEMA A RESOLVER: ENERGÍA Y CALOR EN UN CALEFÓN.

El calefón de gas común, sin tanque de reserva, consiste en un intercambiador de calor en el cual una cañería de cobre tiene varios recovecos y aletas diseñados para que el agua al circular por su interior reciba la máxima cantidad posible (con un costo razonable) de calor de una llama de gas que se enciende automáticamente

cuando el agua circula, y se apaga cuando deja de hacerlo. La figura 1 lo muestra esquemáticamente.

Supongamos que alguien desea bañarse con agua a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁽¹⁾ un día en que la temperatura ambiente es de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, y que gusta de hacerlo con un caudal de por lo menos 5 litros/minuto, regulando el calefón para que no haya que agregar agua fría⁽²⁾.

Supongamos también que, habiendo esperado hasta que se hayan calentado todas las cañerías (situación de "régimen estacionario"), resulta que la temperatura del agua desciende $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde donde está el calefón hasta el baño, y que el 30 % del calor liberado en la combustión se disipa por el ambiente de diversas maneras, sin contribuir al calentamiento del agua.

⁽¹⁾ El autor pensó que este era un valor adecuado para una ducha caliente. Más adelante veremos cómo resultó sorprendido al efectuar mediciones.

⁽²⁾ Esto economiza gas, y protege la cañería de la serpentina.

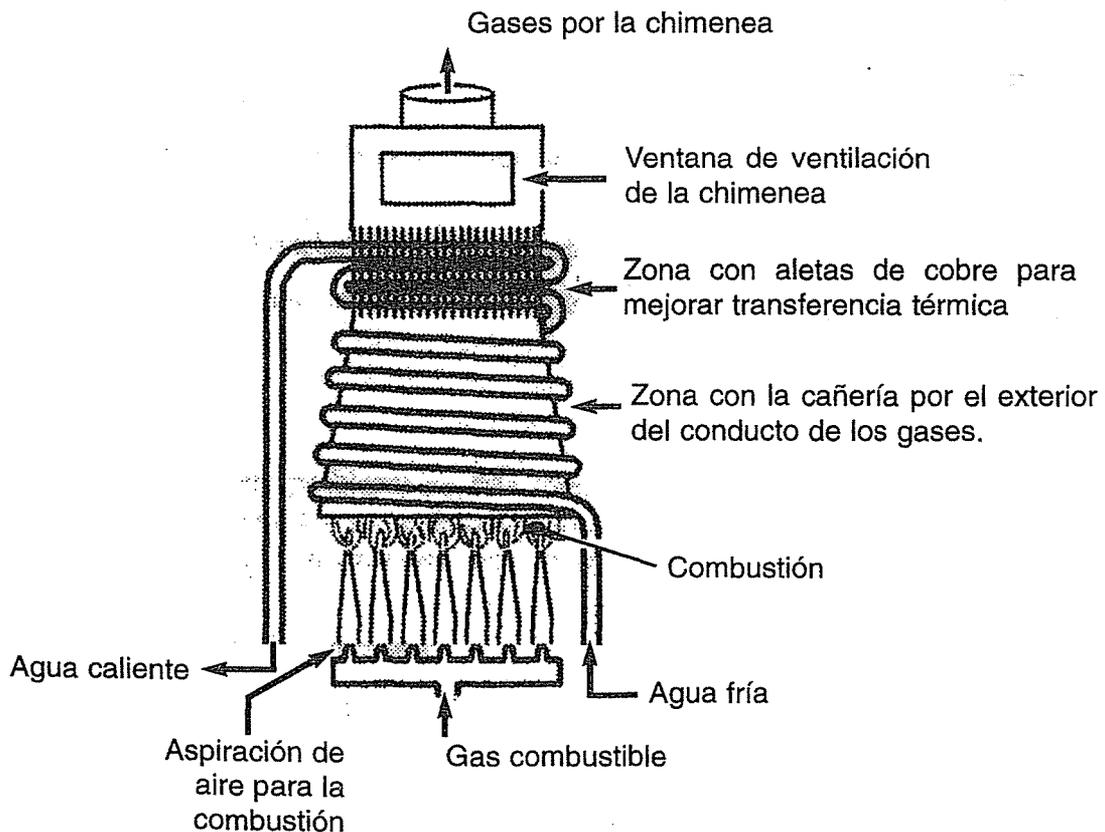


Fig. 1: esquema de un calefón del tipo al que se refiere la propuesta. Se indican algunos elementos relevantes.

Calcular aproximadamente:

a.1) Cuántas calorías debe recibir el agua por minuto al pasar por la cañería del intercambiador de calor.

a.2) Cuántas calorías se pierden por minuto en el trayecto hasta la ducha.

b.3) Cuántos m^3/min de gas de 9300 kcal/ m^3 (dato que figura en las facturas de la empresa distribuidora de gas natural) deben alimentar al quemador.

b.4) Cuántos m^3 de gas se requieren para una ducha de 15 minutos.

Suponiendo que el gas suministrado es metano, que el volumen indicado por el medidor se refiere a presión normal de 1 atm, y que la presión ambiente es también de 1 atm, calcular, para una ducha de 15 min.:

c.1) Cuánto oxígeno se requiere.

c.2) Cuánto de cada producto de la combustión se produce (suponiendo combustión completa).

c.3) Cuál es la relación de mezcla, aire/gas combustible, en los quemadores.

c.4) Cuántos m^3 de aire son necesarios para la combustión.

RESOLUCIÓN.

Si quien desea resolver este problema no está interesado en profundizar ni complicarse, se encuentra ante un problema interesante pero sencillo, del tipo que podríamos llamar ejercicio de aplicación, y que *es lo que encaremos en primera instancia*.

Un ejercicio de aplicación de conceptos.

a.1) Se desea que el agua llegue a la ducha a $65^\circ C$, para lo cual, dado que nos dicen que en el trayecto su temperatura baja $5^\circ C$, en el calefón se debe calentar el agua desde $T_1 = 10^\circ C$, hasta $T_2 = 70^\circ C$. Esto significa: $\Delta T = 70 - 10 = 60^\circ C$.

La cantidad de agua que debe calentarse es de 5 litros (es decir 5 kg) en cada minuto, y como el calor específico del agua es de $C_e \cong 1 \text{ kcal/kg.}^\circ C$, la cantidad de calor que se le debe suministrar por minuto es:

$$Q = C_e m \Delta T \cong 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg.}^\circ C} 5 \text{ kg } 60^\circ C = 300 \text{ kcal}$$

a.2) La cantidad de calor perdida en el trayecto por minuto se calcula de la misma manera, con un salto térmico de

$$5^\circ C: 1[\text{kcal/kg.}^\circ C] \times 5 \text{ kg} \times 5^\circ C = 25 \text{ kcal.}$$

b.1) La cantidad de calor Q' que debió producirse en el quemador (en cada minuto) para que $Q = 300 \text{ kcal}$ lleguen al agua, siendo que el 30% se pierde, entonces, debe cumplir con $Q = Q' - 30\% Q'$, de manera que:

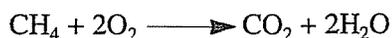
$$Q' = \frac{Q}{1 - 0,30} \cong \frac{300}{0,70} \cong 429 \text{ kcal}$$

Para calcular cuánto gas se debe suministrar por minuto, basta con el dato de que cada m^3 de gas (se supone que correctamente quemado) genera 9300 kcal. Con el poder calorífico del gas expresado de esta manera, podemos obtener directamente el volumen de gas, V_G , que hay que suministrar por minuto:

$$V_G \cong \frac{429 \text{ kcal}}{9300 \frac{\text{kcal}}{m^3}} \cong 0,046 m^3 = 46 dm^3$$

b.2) De manera que hay que alimentar el quemador con $46 dm^3/min$ de gas, y en 15 minutos se consumen $15 \times 46 \cong 691 dm^3 \cong 0,69 m^3$.

c.1) y c.2) Si el gas es metano, CH_4 , la reacción que tiene lugar, suponiendo combustión completa es: metano + oxígeno \longrightarrow dióxido de carbono + agua, cuya ecuación balanceada es:



Esta ecuación puede ser leída diciendo: "cada mol de CH_4 se combina con dos moles de O_2 , para dar un mol de CO_2 y dos moles de H_2O ."

Ahora bien, para expresar las cantidades correspondientes a $1 m^3$ de metano, la manera simple y directa de hacerlo es en volumen, también en m^3 , aunque con la complicación de que requiere que se fijen condiciones de presión y temperatura⁽³⁾. Discutamos un poco eso.

⁽³⁾ La expresión de todas las cantidades en kilogramos puede hacerse directamente con independencia de las condiciones teniendo en cuenta las masas molares de estos compuestos (CH_4 : 16 g; O_2 : 32 g; CO_2 : 44 g; H_2O : 18 g): 16 g de CH_4 se combinan con 64 g de O_2 para dar 44 g de CO_2 y 36 g de H_2O .

Según la ley de Avogadro todos los gases ideales a igual presión y temperatura tienen el mismo volumen molar ($\sim 22,414$ litros/mol a 1 atm y 0 °C), de manera que para los gases ideales en estas condiciones hay la misma relación entre los moles que entre los m^3 .

Ahora bien, en la reacción considerada todos los compuestos son gaseosos, incluso el agua, porque los gases salen muy calientes del sistema. Además todos, productos y reactivos, están a la misma presión, que es la atmosférica del momento, constante, que para simplificar supondremos por ahora de 1 atm.

El que los gases salgan muy calientes del sistema no es deseable, porque toda la energía térmica que ellos se llevan, es energía que no aprovecha el sistema. Cuanto mayor sea la transferencia de calor al agua, menos energía térmica le quedará a los productos de la combustión, y más fríos saldrán por la chimenea.

El mayor aprovechamiento posible correspondería al caso ideal en que los gases "quemados" fuesen enfriados hasta la misma temperatura inicial (temperatura ambiente), y en ese caso sería posible aplicarles directamente la ley de Avogadro para enunciar fácilmente las cantidades de cada uno en m^3 ; pero habría que tener cuidado porque en ese caso el agua podría estar también como líquido, posibilidad que analizaremos luego en más detalle, y que nos reserva algunas sorpresas.

Para simplificar este punto ahora supondremos que enfriamos los gases hasta la temperatura inicial, que el agua no se condensa, y que todos estos gases tienen un comportamiento ideal (esto último resulta ser una buena aproximación para esto, aunque no lo demostraremos).

Entonces podemos leer la misma ecuación anterior diciendo: *cada m^3 de metano se combina con $2 m^3$ de oxígeno, para dar las cantidades de dióxido de carbono y de vapor de agua que ocuparían $1 m^3$ y $2 m^3$ respectivamente a la misma temperatura que los reactivos.*

c.3) Con respecto a la cantidad de aire que interviene en la combustión, basta recordar que el aire es una mezcla de aproximadamente 4 partes de nitrógeno y 1 parte de oxígeno. Esto significa que cada m^3 de oxígeno está en $5 m^3$ de aire, acompañado de $4 m^3$ de nitrógeno; y por lo tanto, si cada m^3 de metano se combina con $2 m^3$ de oxígeno, requiere para ello $10 m^3$ de aire. Esta es la relación de mezcla para la combustión

ideal: aproximadamente⁽⁴⁾ 10 volúmenes de aire por cada volumen de metano.

c.4) Y por último, las cantidades involucradas en la ducha de 15 minutos serían: se consumen $0,69 m^3$ de metano y $1,38 m^3$ de oxígeno (que vienen en $6,9 m^3$ de aire), para dar las cantidades de dióxido de carbono y vapor de agua que ocuparían, a la misma temperatura inicial del metano (10 °C) respectivamente $0,69$ y $1,38 m^3$.

Aquí concluye, sin sobresaltos, el ejercicio.

Es un ejercicio interesante, y hasta puede pensarse que es equivalente a lo que puede hacerse obteniendo los datos de mediciones efectuadas en realidad y efectuando los cálculos sobre la base de ellos.

Pero no lo es. Para darnos cuenta de lo distinto que es calcular sobre mediciones hechas en la realidad, podemos plantear la siguiente cuestión.

Hemos calculado que en el quemador se producían aproximadamente 429 kcal por minuto, y que un 30% de ellas, es decir, alrededor de 130 kcal/min no eran aprovechadas por el agua.

¿Importó algo el desperdicio de 130 kcal/min?

NO, en absoluto. Tanto así que seguimos calculando, hasta que finalmente declaramos terminado el ejercicio/problema.

¿Por qué no importaron las 130 kcal/min?

¿Por qué deberían haber importado? ¿Qué haríamos si no nos pareciese un valor razonable?

Probablemente revisaríamos los cálculos y obtendríamos los mismos valores. ¿Podríamos hacer otra cosa?

Sí, porque los datos no tienen soporte experimental. Podríamos cambiarlos hasta solucionar cualquier cosa que no guste. Por ejemplo, ¿quién dijo que es el 30% lo que no se aprovecha

⁽⁴⁾ Haciendo los cálculos con un poco más de prolijidad se obtiene 9,52 en lugar de $10 m^3$, porque el porcentaje de oxígeno en el aire es 21 y no 20. A pesar de ello mantendremos aquí y en otras partes esta aproximación más simple. Haremos cálculos deliberadamente simplificados, porque consideramos que contribuyen a la claridad del conjunto. En el Apéndice 1 están los cálculos más rigurosos.

de la energía?

Esa es la razón fundamental para no preocuparnos por la verosimilitud de los resultados: no pueden tener el peso de los datos obtenidos de la realidad.

EL PROBLEMA PLANTEADO EN TORNO A UNA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL.

Veamos qué pasa al plantear el mismo problema en torno a una actividad experimental.

Consideremos: *"tomar todos los valores correspondientes al problema anterior durante una ducha en el propio domicilio, y repetir los cálculos con esos valores. Señalar aspectos notables o conflictivos que ponga de manifiesto la experiencia, y analizarlos."*

Los siguientes son datos efectivamente registrados en una situación real, con un calefón común, relativamente modesto.

Registros comentados.

Las temperaturas se registran con termómetro de mercurio de apreciación 1 °C.

Temperatura ambiente: $T_a = 15$ °C (era un día frío).

Temperatura del agua inmediatamente a la salida del calefón: $T_1 = 51$ °C.

Para medir esta temperatura se tomó agua de una canilla conectada directamente al calefón, después de haber regulado bien la temperatura de la ducha, y por supuesto, habiendo llegado a un régimen estacionario bien verificado. Regulando cuidadosamente el caudal correspondiente a la ducha, y se midió que el agua salía de esta canilla a 50 °C. Como el caño desde el calefón con todos los recovecos totaliza aproximadamente 1,8 m, se pudo inferir (utilizando los datos que siguen) que en este tramo la temperatura del agua descendía aproximadamente 1 °C, y que por lo tanto debe llegar a 51 °C directamente después de la serpentina del intercambiador de calor.

Temperatura del agua a la salida de la regadera de la ducha: $T_2 = 44$ °C (el baño está lejos del calefón, debe haber alrededor de 12 m de cañería, del tipo común: caño de hierro galvanizado, 1/2 pulgada de diámetro, embutido en pared).

1era. SORPRESA: una ducha con agua muy caliente no supera los 45 °C. El conductor de esta experiencia encontró que no podía soportar el agua a 46 °C porque lo quemaba. Después de varias regulaciones tomó su ducha bien caliente a 44 °C, muy sorprendido de que solamente 7 °C por encima de la temperatura del cuerpo produjesen tal efecto (vemos que la regulación de la temperatura del cuerpo es algo realmente muy delicado). La curiosidad llevó a determinar la temperatura del agua para unos buenos mates, que resultó estar entre 80 y 85 °C⁽⁵⁾.

Caudal de agua:

$$4,7 \text{ L/min} \cong 0,078 \text{ L/s} = 7,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Se estima una incerteza del 5%. Se cronometró un tiempo de $(25,6 \pm 0,5)$ s para llenar un recipiente de $(2,00 \pm 0,04)$ L.

Caudal de gas:

$$4,37 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cong 26,2 \text{ dm}^3/\text{min}$$

Se estima una incerteza del 1%. Se cronometraron 3 minutos y 49 segundos para 100 dm³ de gas indicados por el reloj del medidor domiciliario, de apreciación 1 dm³. La experiencia repetida otro día de la misma temperatura arroja una diferencia del 1,3%.

Cálculos.

Ahora efectuemos los mismos cálculos anteriores, pero con los valores experimentales.

La cantidad de grados que hay que calentar el agua es: $\Delta T = 51 - 15 = 36$ °C.

La cantidad de agua que debe calentarse es de 4,7 kg en cada minuto, de manera que la cantidad de calor que se le debe suministrar al agua por minuto es:

$$Q = C_e m \Delta T \cong 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times 4,7 \text{ kg} \times 36 \text{ }^\circ\text{C} \cong 169 \text{ kcal}$$

La cantidad de calor perdida en el trayecto

⁽⁵⁾ El asunto del mate también resultó ser muy interesante. El agua para cebar mate se debió calentar hasta cerca de 83 °C, temperatura a la que se la guardó en un termo. Ahora bien, la bombilla metálica colocada dentro del mate es un excelente disipador de calor al ambiente, y la temperatura del agua, una vez en el mate, permaneció entre 65 y 70 °C. Hasta allí llegaron las mediciones. Es previsible que el agua se enfríe bastante más aún mientras es succionada a través de la bombilla, y podemos pensar que tal vez ingresa a la boca a menos de 60 °C.

por minuto se calcula de la misma manera, con un salto térmico de 7 °C:

$$1[\text{kcal/kg}\cdot^{\circ}\text{C}] \times 4,7 \text{ kg} \times 7^{\circ}\text{C} \approx 33 \text{ kcal.}$$

La cantidad de calor Q' que se produjo en el quemador por minuto ahora puede calcularse directamente, pues se dispone del dato del caudal de gas (26,2 dm³ en cada minuto). Adoptaremos por ahora para el poder calorífico el dato de la boleta, 9300 kcal/m³, que más adelante discutiremos. Resulta:

$$Q' \approx 26,2 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{min}) \times 9300 (\text{kcal}/\text{m}^3) \\ \approx 244 \text{ kcal}/\text{min}$$

La cantidad de calor que se genera y no llega al agua por minuto es:

$$Q' - Q \approx 244 - 169 \approx 75 \text{ kcal,}$$

que es el 31% de Q' .

El volumen de gas consumido en 15 minutos es:

$$15 \times 26,2 \approx 393 \text{ dm}^3 \approx 0,39 \text{ m}^3.$$

El balance de la ecuación química y las consideraciones que lo acompañan no sufren ningún cambio más que en las cantidades totales: en la ducha de 15 minutos, se consumen 0,39 m³ de metano y 0,79 m³ de oxígeno (que vienen en 3,9 m³ de aire), para dar las cantidades de dióxido de carbono y vapor de agua que ocuparían, a temperatura ambiente (15 °C) respectivamente 0,39 y 0,79 m³.

Y aquí podríamos decir que termina el problema. Pero no termina, porque ahora el que lo resuelve es al mismo tiempo responsable por los valores utilizados, y siente que debe revisarlos y compararlos de diversas maneras para no estar entregando algo con errores gruesos, o que pueda parecer o resultar ridículo.

Una cosa que debe hacerse es repetir la experiencia, en igual situación, y con algunas variaciones. En este caso, al hacer eso todo concordó muy bien, prácticamente dentro del 1%; esto es bueno, indica una precisión realmente grande, pero no garantiza que todo haya sido correcto, y debe ser complementado con otros análisis críticos de lo actuado.

Por ejemplo otra cosa que debe hacerse es plantear preguntas y comparaciones orientadas a revisar la consistencia de todos los valores que participan.

Una comparación que surge inmediatamente, es: ¿cuánto es la potencia calorífica del quemador? ¿Cómo es en comparación con otras cosas que uno conozca?

Veamos eso.

La potencia calorífica del quemador ha sido determinada como: 244 kcal/min. Desearíamos traducirla a kW o HP (1 HP \approx 3/4 kW), para poder comparar más fácilmente.

$$\text{Potencia} = 244 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{4,18 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \\ \approx 17 \text{ kW} \\ \approx 23 \text{ HP}$$

Aquí viene algo que podría ser la **2da SORPRESA**: esto es mucha potencia. El experimentador recuerda haber tenido hace mucho una motocicleta que le parecía muy potente, y que a plena potencia llegaba a los 7 HP. Y aunque las motocicletas y los automóviles ahora son mucho más potentes, han existido automóviles con menos de 23 HP; y no podemos dejar de pensar en el efecto de 23 caballos tirando ordenadamente de algo.

Bien, en realidad es razonable que haya aquí muchos HP, ya que los procesos térmicos suelen involucrar cantidades de energía que desde el punto de vista de sus efectos mecánicos pueden parecer grandes. Por eso es que con pequeñas cantidades de gasolina un automóvil puede andar muchos metros, y que una persona también puede en situaciones extremas, trabajar mucho con una mínima alimentación. Pensemos que Robert Julius von Mayer había establecido que una cierta cantidad de agua tenía que caer 365 m (y el valor correcto es \sim 410 m) para subir su temperatura 1 °C; y esto podría leerse diciendo que la energía necesaria para elevar la temperatura de cualquier masa de agua en 1 °C, es suficiente para elevarla 410 m.

Lo que sí merece ser revisado ahora es: si se pierden 75 kcal/min, es decir unos 7 HP, que es la potencia máxima de mi recordada moto, ¿a dónde se van?

Estamos en régimen estacionario, poniendo la mano cerca no parece que se esté calentando terriblemente el ambiente cerca del calefón, y lo único que se lleva un caudal interesante de calor es el gas quemado que sale por la chimenea.

Pero, ¿estamos gastando 7 HP para calentar

aire? ¿Hasta qué valor deberían subir la temperatura de los productos de la combustión de los 26,2 dm³ de metano con los 262 dm³ de aire, luego de quedarse en cada minuto con las 75 kcal \approx 314 kJ que no llegan al agua?

Hagamos un cálculo estimativo rápido: un mol de cualquier gas a 15 °C, ocupa:

$$22,4 \text{ dm}^3 \times \{(273+15)/273\} = 23,6 \text{ dm}^3,$$

de manera que estamos hablando de 26,2/23,6 \approx 1,1 moles de metano, que se queman por minuto en 262 dm³ de aire, para dar 1,1 moles de CO₂, 2,2 moles de agua, y 8,8 moles de nitrógeno. A los fines de hacer una estimación rápida (que después corregiremos) digamos que como los gases producto de la combustión salen muy calientes el agua no está condensada, y tenemos unos 12 moles en total de los distintos gases mezclados, en donde la mayor parte es nitrógeno, tanto antes como después de la combustión.

Podemos abreviar pensando que utilizamos los 314 kJ para calentar 12 moles de nitrógeno (de calor específico $C_p \approx 7/2 R \approx 29 \text{ J/mol.K}$), y en ese caso obtenemos:

$$\Delta T = \frac{314 \times 10^3 \text{ J}}{29 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \times 12 \text{ mol}} \approx 900 \text{ K} \approx 900 \text{ }^\circ\text{C}$$

El sentido común nos indica que la temperatura de los gases ni siquiera se acerca al valor calculado (15 + 900 = 915 °C = 1188 K). Por más que afinemos las estimaciones, que han sido algo burdas, parece evidente que tenemos que revisar cosas -tal vez debamos revisar conceptos, tal vez debamos revisar el calefón. Seguramente aprenderemos algo.

Ahora estamos obligados a plantearnos:

a) ¿Estamos simplemente frente a errores de medición? Todo el problema de nuestro cálculo parece residir en el calor generado que no aprovecha el agua, el cual llega a cerca del 30%. Una incerteza de un 15% en el cálculo de las calorías absorbidas por el agua, y otro 15% en el cálculo de las calorías producidas por el gas, bien puede hacer que aparezca una discrepancia del 30%.

b) ¿Cuál es realmente la temperatura y el caudal de los gases después de que pasan por el intercambiador de calor del calefón?

c) ¿Es correcto el dato de que el poder calorífico del gas es de 9300 kcal/m³? ¿Es correcta la interpretación de ese dato?

d) ¿Es correcto el funcionamiento del medidor de gas? Nuestra lectura tiene mucha precisión, pero si la calibración fuese incorrecta, podríamos estar en presencia de un error sistemático responsable de la discrepancia.

Inspeccionar las posibles respuestas a estas preguntas puede resultar en una información muy útil para los profesores que podrían estar interesados en plantear problemas como éste.

Comenzaremos la tarea siguiendo el orden de las preguntas que nos hemos planteado.

a) Las incertezas en los valores medidos

Revisando y repitiendo las mediciones se llega a la conclusión de que no hubo errores groseros ni es posible atribuirle la discrepancia a errores de tipo aleatorio; y hay indicios de que antes de atribuirle la responsabilidad a la calidad del gas, o al medidor, deberíamos revisar varios detalles y conceptos.

b) El caudal en la chimenea

La temperatura de los gases que salen se mide directamente, y resulta ser de 190°C. Es bastante fluctuante, podríamos decir: 190 \pm 10 °C.

Como la temperatura ambiente era de 15 °C, estamos frente a un $\Delta T \approx 175 \text{ }^\circ\text{C}$, que es sólo la quinta parte de los 900 °C esperados.

Ahora bien, al tratar de desacoplar la chimenea para realizar la medición se cae en la cuenta de que el sistema tiene una ventana para aspiración de aire, con el evidente propósito de mezclar los gases calientes con aire fresco y así evitar que la temperatura suba demasiado.

Razonamos pensando que si el gas que brota del pico inyector puede aspirar 10 veces su volumen de aire para quemarse correctamente, bien puede el gas quemado, que sube con real violencia, aspirar 5 veces su volumen, y mucho más, con lo cual estarían ubicadas las calorías perdidas, y solamente deberíamos lamentarnos de que el sistema desperdicie tanta energía.

Se impone entonces medir el flujo de gas en la chimenea.

Se hicieron intentos de medir el tiempo

demorado en llenar con los gases de escape una bolsa de volumen determinado, y todos fallaron por varias razones diferentes (el gas era muy caliente para esto). En el proceso se descubrió que la chimenea era realmente un desastre. No encajaba bien, tenía un doble codo que obstruía bastante el flujo, tenía muy mal tiraje, etc. Y el extremo era inaccesible.

Se decidió medir el empuje aerodinámico sobre un pequeño disco colocado en el centro del conducto perpendicularmente al flujo. Para ello el disco se montó sobre una varilla que pivoteaba horizontalmente sobre el filo del borde del caño de salida⁽⁶⁾, y que se equilibraba en el extremo opuesto agregando o quitando pequeños contrapesos, como se ilustra en la figura 2.

El diámetro del conducto de salida de los gases del calefón era de 10 cm, y el empuje medido sobre el disco de 29 mm de diámetro resultó de $\approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ N}$. Ahora bien, para determinar la velocidad del gas a partir del valor del empuje, en general no se cuenta con expresiones seguras, pero en principio, a los fines de estimar, se puede aplicar la siguiente expresión, (cuya razón de ser se discute un poco en el Apéndice 3):

$$F = \alpha \delta S v^2$$

Siendo:

α : coeficiente de forma; para este caso del orden de la unidad o algo menos,

⁽⁶⁾ Previamente, claro está, se desacoplaba la chimenea. Si ésta hubiese sido una buena chimenea, con buen tiraje, su desacople hubiese producido una notable disminución de caudal. Pero realmente todos los indicios fueron de que se producía ningún cambio.

δ : densidad del aire

S : sección transversal;

v : velocidad de flujo.

Considerando $0,73 \text{ kg/m}^3$ el valor de la densidad del aire a 190°C y 726 mmHg , que era la presión atmosférica de ese día en Córdoba, nos queda $F \approx 0,7 (\text{N.s}^2 / \text{m}^4) \times S v^2$, expresión a partir de la cual se obtiene v del orden de $1,5$ ó 2 m/s (resultado válido sólo en el orden de magnitud).

Para revisar la validez de este dato y mejorarlo, se reprodujo el empuje en otro lugar en el cual se podía medir con cierta precisión la velocidad del aire, y se logró aproximadamente el mismo empuje sobre el disco con una velocidad de aire (a temperatura ambiente) de $\approx 0,8 \pm 0,2 \text{ m/s}$.

Para el gas de la chimenea, más caliente, la densidad es menor y el mismo empuje se puede lograr con una velocidad v' algo mayor. Si aplicamos que el empuje es proporcional a la densidad y al cuadrado de la velocidad, entonces, suponiendo que por la chimenea escapa aire a 190°C , y que aplica el mismo empuje que aire a 15°C y $0,8 \text{ m/s}$, todo a la misma presión ambiente, diríamos:

$$\text{densidad}(15^\circ \text{C}) \times 0,8^2 = \text{densidad}(190^\circ \text{C}) \times v'^2.$$

De aquí deducimos que:

$$v' \approx 0,8 \text{ m/s} \times \sqrt{\frac{\text{dens}(15^\circ \text{C})}{\text{dens}(190^\circ \text{C})}}$$

$$\approx 0,8 \times \sqrt{\frac{273+190}{273+15}} \approx 1,0 \text{ m/s}$$

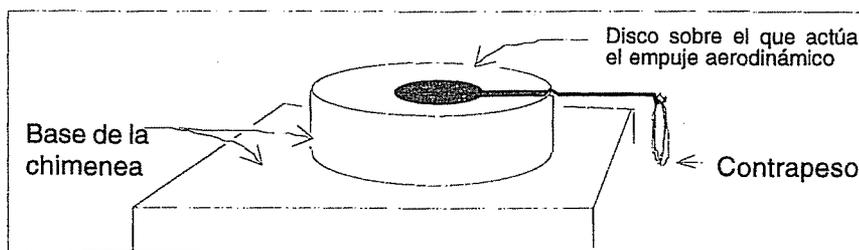


Figura 2: detalle del sistema empleado para determinar la velocidad de los gases en la chimenea. La varilla es equilibrada en el extremo derecho con distintos contrapesos, en las situaciones con y sin flujo de gas en el conducto. Los contrapesos se hacen enrollando alambre calibrado de cobre, cuyo peso se conoce fácilmente en función de su longitud.

Este valor es más confiable que el anterior, de manera que atribuyéndole un peso mayor, con precisión razonable podemos estimar para los gases de escape:

velocidad: 1,2 m/s

caudal: $1,2 \text{ m/s} \times \pi \times (0,05 \text{ m})^2 \cong 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
 $\cong 9 \text{ L/s}$,

a 190 °C y 726 mmHg;

Ahora bien, dijimos que a 15°C (y 726 mmHg) ingresan $\cong 0,47 \text{ L/s}$ de metano, que luego de mezclarse con el aire reaccionan para dar gases que (en iguales condiciones) ocuparían 11 veces el volumen inicial de metano ($11 \times 0,47 = 5,2 \text{ L/s}$), y por lo tanto a 190 °C y la misma presión, estos gases, sin ningún agregado de aire extra, representarían un caudal de:

$$5,2 \cdot \frac{273+190}{273+15} \cong 8,3 \text{ L/s}$$

Estos valores, a pesar de las incertezas que los afectan, nos permiten establecer con seguridad que no hay un agregado notable de aire extra en la ventilación de la chimenea ni en las demás partes.

Probablemente ocurra el aspirado de una masa de aire del orden del 10 o 20 % de la de los gases producidos por la combustión. Pero con seguridad no es mucho más que eso. Es claro que el aire fresco aspirado, si es que existe, no alcanza a enfriar apreciablemente los gases del escape, ni a modificar sustancialmente su caudal.

c) El poder calorífico del gas

Necesariamente debemos continuar preguntándonos acerca del poder calorífico del gas.

Todas las facturas de gas registran (entre otros) los siguientes datos (los valores en cursiva han sido tomados de una factura real):

m ³ consumidos	240
Consumo facturado corregido a 9300 cal/m ³	244
Calorías suministradas	9453

El valor 9300 cal/m³ aparece impreso en el formulario, mientras que el valor 9453 fluctúa levemente de un bimestre a otro; por ejemplo en las últimas tres facturas ha sido: 9462, 9434, y

9453. Y siempre se utiliza la relación entre ese número y 9300 para corregir la cantidad de metros cúbicos que registra el medidor.

¿Qué significa exactamente todo esto?

Para conocer detalles nos dirigimos a la planta de ECOGAS, en donde obtenemos información realmente valiosa, que resumimos a continuación pues puede ser de gran utilidad para los profesores que intenten plantear problemas en torno a estas cuestiones.

En la Planta de ECOGAS de Córdoba se distribuye a la ciudad gas natural (GN) del "gasoducto norte", proveniente de Campo Durán, aunque se tiene acceso, y se monitorea allí también el "gasoducto sur", proveniente de Las Latas.

La composición del gas de cada gasoducto se monitorea aproximadamente cada 6 minutos, y los datos se promedian diariamente, y luego bimestralmente para configurar el dato: "calorías suministradas" para el usuario. De manera que en la factura se establece un valor nominal fijo de 9300 kcal/m³, con respecto al cual se corrige la factura según los promedios bimestrales⁽⁷⁾.

Comparando varios informes diarios puede verse que los suministros de ambos gasoductos son muy similares, y registran diferencias de alrededor del 1% en los componentes importantes.

Puede decirse que esencialmente el GN es metano en un 90%, y para mayor información en la Tabla 1 transcribimos algunos de los registros de un monitoreo del gasoducto norte.

Algunos comentarios.

Puede decirse que el gas natural "debería" ser metano puro. La presencia de hidrocarburos más pesados en la mezcla no es considerada un problema pues ellos contribuyen a aumentar el poder calorífico. Por otra parte es una buena ilustración de cómo los hidrocarburos más pare-

⁽⁷⁾ La empresa cobra por la cantidad de energía suministrada, y son los grandes usuarios industriales los que a su vez también controlan y eventualmente reclaman, precisamente sobre la base de la cantidad de energía recibida. No fue posible conocer la forma exacta en la cual se ha determinado el valor 9300 kcal/m³, pero no importa demasiado; lo que sí importa aquí es saber que a partir de los datos de los monitoreos podemos determinar con bastante precisión el poder calorífico del gas que utilizamos.

Componentes	% volumen	Poder calorífico superior (MJ / m ³ _{GasNaturalseco})*	Densidad relativa (aire = 1)
metano	90,530	34,126	0,5014
etano	5,954	3,932	0,0618
CO ₂	2,021	0,000	0,0307
nitrógeno	0,895	0,000	0,0087
propano	0,455	0,428	0,0069
n-butano	0,056	0,068	0,0011
isobutano	0,042	0,052	0,0009
isopentano	0,020	0,030	0,0005
n-pentano	0,013	0,020	0,0003
C ₆ + superiores	0,014	0,027	0,0004
TOTALES	100,000	38,682	0,6128
Promedios 24 hrs. corregidos por falta de idealidad del gas.		38,773	0,6140

* Los valores de esta columna se refieren a: poder calorífico superior, es decir, con condensación del agua de combustión (ver aclaración más adelante), por cada m³ de gas natural seco (se exige a ECOGAS no superar 63 mg/m³ de vapor de agua, lo que hace un porcentaje volumétrico < 0,008%).

Tabla 1. Gas Natural
(valores normalizados a 1,000 atm, y 15°C).

cidos son separados con más dificultad. En la Tabla 1 vemos que el único que está en cantidad apreciable es el etano, y su presencia allí sólo representa perjuicio (económico) para la planta productora de gas, que siempre podría obtener mejores réditos del etano dándole otro destino.

Distinto es el caso del dióxido de carbono y del nitrógeno. Éstos reducen el poder calorífico de la mezcla, y su presencia perjudica en primer término a ECOGAS, ya que cobra por la energía y no por el volumen suministrado. Además, según comentarios del ingeniero encargado del monitoreo, la empresa está sujeta a fiscalización y debe cumplir con un tope máximo de proporción de estos gases, lo cual la coloca actualmente en aprietos porque el porcentaje de dióxido de carbono ya está muy cerca del tope, y no hay nada que ellos puedan hacer para corregir eso, más que protestar.

Al parecer la imposibilidad de disminuir el porcentaje de estos gases radica en que el gran incremento del consumo de los últimos tiempos hace que las plantas productoras estén traba-

jando totalmente sobrecargadas.

Estas y muchas otras son cosas de las que uno se entera cuando abandona un poco los problemas de lápiz y papel para introducirse en el mundo de los problemas experimentales.

Otra cosa que obtuvimos al visitar ECOGAS, fue el Manual del instalador gasista, en el cual se encuentra información muy interesante, de la cual transcribimos algo a continuación.

La presión del gas.

Uno de los datos que se encuentran en el Manual es la presión "manométrica" (es decir, relativa) del gas en las distintas etapas de la distribución, y de allí surgió el dato de que ésta vale 20 hPa para la distribución domiciliaria.

De más está decir que inmediatamente después de leer ese dato quitamos un quemador de la cocina, colocamos una manguera de látex en el pico, y con una manguera de plástico en U, con agua, medimos la presión en el propio esce-

nario de los experimentos, que resultó ser de 28 cm de agua, es decir 28 hPa. Después de todo lo dicho queda claro que ese valor excesivamente alto de la presión deberá ser considerado para corregir nuestros cálculos del poder calorífico, tema del cual nos ocupamos inmediatamente.

Otro dato fundamental para nuestro problema es cómo se define exactamente el poder calorífico en este oficio. Según el Manual:

“Poder calorífico: Se adopta como poder calorífico a los fines de la facturación al poder calorífico superior del gas, o sea el número total de calorías que se produzcan por la combustión a presión constante de una cantidad de gas saturado con vapor de agua que ocupe 1 m³ a una temperatura de 15 °C y a una presión absoluta de 1,033 kg/cm² (0,101 Mpa) con condensación del vapor de agua de combustión.”

¡Esto es importante para nuestro problema! En los sistemas domésticos el aprovechamiento del calor suele ser pobre (y en nuestro calefón peor), y el gas sale muy caliente, *sin que haya condensación del agua.*

De manera que del poder calorífico que utilizamos en los cálculos debemos restar una gran cantidad de energía que corresponde a la vaporización de toda el agua formada en la combustión⁽⁸⁾.

Esto resulta corroborado cuando buscamos una tabla de poderes caloríficos o entalpías de

combustión; en ella encontramos para el metano (seco) a 15°C y 1,000 atm:

Poder calorífico superior (con condensación del agua producida): 891,5 kJ/mol

Poder calorífico inferior (sin condensación del agua producida): 802,7 kJ/mol

La diferencia, 88,8 kJ (~10% del poder calorífico superior), es el calor de vaporización de los dos moles de agua producidos, ya que el calor de vaporización del agua a 15 °C y 1,000 atm es: 44,4 kJ/mol (en el Apéndice 2 hay una discusión sobre este valor).

Así que para nuestro caso, sin condensación del agua formada, debemos disminuir en un 10% la anterior estimación del poder calorífico del metro cúbico de gas (siempre a cuenta de un cálculo más completo que presentaremos en el Apéndice). Como teníamos un exceso de cerca del 30%, sabemos que debemos seguir buscando otras posibles fuentes de discrepancia. Nos queda aún por investigar el medidor de gas.

d) El medidor.

Para controlar el medidor se puede recurrir a la empresa ECOGAS, pero para abreviar probamos llenando de gas, con la manguera de látex conectada al pico de una hornalla desmontada, un recipiente de (10,0 ± 0,1) L inicialmente lleno de agua e invertido dentro de una palan-gana con agua. Se tomaron algunas precauciones para que no se disolviera apreciablemente el CO₂ en el agua⁽⁹⁾, y se encontró que cuando el recipiente de 10 litros se llenaba, con una presión manométrica prácticamente nula (1 o 2 cm de altura de agua), el medidor registraba (promedio de varias repeticiones) (10,5 ± 0,1) litros.

Vemos que el medidor tiene un error en exceso del 5%. En realidad el error es del 8%, porque la cantidad de gas que luego llenaría el recipiente de 10 L, al pasar por el medidor el gas a la presión manométrica de 28 hPa ocupaba un

⁽⁸⁾ Además está el detalle de que para la definición de ECOGAS el gas debe estar saturado de humedad. Este detalle es de menor importancia, y tiene que ver con consideraciones experimentales: si enfriamos los productos de la combustión hasta la temperatura inicial, el vapor de agua no podrá condensar en su totalidad, ya que el agua líquida quedará en equilibrio con su vapor, con el gas restante saturado de humedad. Si deseamos que condense toda el agua formada, podemos partir de gas y aire inicialmente saturados de humedad, así tendremos aproximadamente la misma cantidad de vapor antes que después de la combustión, y el agua que condensará será toda la de la combustión.

Ahora bien, hay que entender que la definición del poder calorífico a partir del vapor húmedo tiene que ver con la definición del número 9300 kcal/m³, pero la empresa distribuye gas seco, como se desprende de los valores del monitoreo mostrado en la Tabla 1. La empresa debe, por un lado, cumplir con normativas que restringen el contenido de vapor a menos de 63 mg/m³, y por otro lado, evitar problemas de corrosión en sus cañerías, que serían introducidos por el ácido carbónico resultante de la reacción del vapor de agua con el dióxido de carbono.

⁽⁹⁾ En realidad no se puso demasiado cuidado en esto. Lo que se hizo fue hacer burbujear un poco el gas dentro del agua que se iba a usar, hasta pensar que ésta ya había absorbido todo el gas que se podía disolver en un tiempo breve. Luego se procedió a la determinación descrita, cuidando ahora de que al llenar de gas el botellón la manguera saliera siempre sobre el agua, para que no hubiese burbujeo. Se piensa que la cantidad de CO₂ que se puede disolver en estas condiciones, difundién-dose desde encima de la superficie en corto tiempo, tiene que ser mucho menor que la que previamente se hubo disuelto mientras se produjo el burbujeo.

volumen de 9,7 litros, y eso es lo que (suponemos) debería haber indicado el medidor (suponemos, porque realmente no pudimos saber con qué criterio están calibrados los medidores; también sería posible que estén calibrados para indicar un caudal equivalente al que habría en determinadas condiciones de presión y temperatura).

Para nuestro caso, si corregimos la lectura del medidor disminuyendo su valor en un 5%, tendremos el volumen de gas a presión manométrica cero (es decir presión absoluta igual a la presión ambiente, que ese día en Córdoba resultó ser de 726 mmHg). Esta presión ambiente, a su vez, resulta ser 4,5% menor que 760 mmHg = 1,000 atm, y nos da otro factor de corrección que puede aplicarse o bien al poder calorífico que hemos utilizado en nuestros cálculos, o bien al caudal de gas. Haremos lo primero.

Caudal corregido de gas:

De manera que podemos tomar como valor corregido del consumo de gas para nuestra ducha:

$$0,95 \times 4,37 \times 10^{-4} \cong 4,15 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \\ \cong 25 \text{ dm}^3/\text{min}.$$

Por último digamos, antes de hacer los cálculos definitivos, que entre tantos experimentos se descubrió que la abertura de ventilación de la chimenea funcionaba tan mal que por ella escapaba parte de los gases, en vez de producirse la aspiración de aire fresco. Se estimó que lo que escapaba por allí era muy poco, probablemente del orden del 10% del flujo total. De manera que es posible pensar que el flujo total de gases quemados era un 10% mayor que lo determinado en la chimenea, ya que esa fracción escapa antes del punto de medición. Esta no es una corrección importante, pero establece algún margen para el cálculo del flujo de gases que escapan.

Los cálculos definitivos y la resolución de los problemas.

Se mantiene sin variantes que hay que calentar 4,7 kg de agua por minuto desde los 15 a los 51 °C, y que para ello se requieren aproximadamente 169 kcal/min.

La cantidad de calor Q' que se produjo en el quemador por minuto ahora se calcula partiendo de que el caudal de gas es 25 dm³/min a presión ambiente igual a 726 mmHg, cuyo poder calorífico se determina teniendo en cuenta que:

a) el poder calorífico superior del gas

natural (seco), según valores promedio de monitoreos, puede tomarse (a 15 °C, y 1,000 atm) como:

$$38,8 \text{ MJ/m}^3 \cong 9270 \text{ kcal/m}^3$$

b) este valor corregido por la falta de condensación del agua vale un 10% menos, es decir: poder calorífico inferior del gas (seco) a 15 °C y 1,000 atm: 8343 kcal/m³

(Estamos haciendo una aproximación gruesa al plantear que esta corrección es del 10%; el cálculo correcto se debe hacer conociendo la cantidad de agua que se produce en función de la composición exacta del gas, y lo hacemos en el Apéndice 1, en donde se podrá verificar que esta aproximación es bastante buena).

c) este valor corregido para dar cuenta del verdadero valor de la presión ambiente se transforma en: poder calorífico inferior del gas a 15 °C y 726 mmhg:

$$8343 \cdot \frac{726}{760} \cong 7970 \text{ kcal/m}^3$$

Y éste es el valor con el cual debemos hacer nuestros cálculos.

Resulta:

$$Q' \cong 25 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{min}) \times 7970 (\text{kcal/m}^3) \\ \cong 199 \text{ kcal/min}$$

La cantidad de calor que se genera y no llega al agua por minuto es:

$$Q' - Q \cong 199 - 169 \cong 30 \text{ kcal},$$

que es el 15% de Q' .

Una parte de estas 30 kcal/min es hallada fehacientemente en los 9 litros/s de gases calientes (a 190 °C) que escapan por la chimenea.

Veamos el cálculo. Sabemos que los 9 litros/s de gas caliente en la chimenea se componen mayoritariamente de nitrógeno. Haremos un cálculo simplificado, como ya hicimos antes, tratando a estos gases como si fuesen nitrógeno, y en el Apéndice 1 mostraremos el cálculo completo, para verificar que no difiere en mucho.

El volumen molar (de los gases ideales) a 190 °C y 726 mmHg, es aproximadamente, de

manera que 9 litros/s a 190 °C y 726 mmHg representan $9/40 \cong 0,226$ moles/s. Y dado que el calor específico del nitrógeno es 29 J/mol.K, tenemos, según nuestro cálculo simplificado, que la cantidad de calor para llevarlo desde los 15 a los 190 °C vale:

$$0.226 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot 29 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (190-15) ^\circ\text{C} \cong$$

$$\cong 1,15 \text{ kW}$$

$$\cong 0,27 \text{ kcal/s}$$

lo cual hace unas 16 kcal/min.

La cantidad que falta explicar, entonces son:

$$30 - 16 = 14 \text{ kcal/min} \cong 1 \text{ kW.}$$

Pero esto no necesita explicación. Si se espera hasta que el sistema entre en régimen, y se coloca la mano cerca del calefón, encima y a los costados, se percibe el calor irradiado, así como, según el lugar, el movimiento ascendente del aire caliente. Y, sin hacer cuentas, se puede estimar que no es muy distinto de una estufa eléctrica con una vela encendida (1 kW). No deja de haber desperdicio de energía, pero el aparente misterio ha sido resuelto. Y hemos aprendido mucho en el camino.

CONCLUSIONES.

En este trabajo se ofrece un entrenamiento y una serie de datos específicos para que los lectores puedan luego desarrollar propuestas dentro del tema, pero además se ha tratado de ilustrar,

con un ejemplo específico, algo que se considera general, que es la conveniencia o necesidad de que una gran parte de los problemas que se plantean a los estudiantes a lo largo del estudio de temas de Física, vayan en paralelo con una situación experimental convenientemente guiada para el aprendizaje de conceptos.

Adherimos a la idea de que "todo conocimiento es respuesta a un problema".

Vemos en este ejemplo cómo la actividad experimental (adecuadamente orientada), es una fuente fecunda de problemas que naturalmente pueden motivar para el estudio y la investigación y estimular la creatividad para el trabajo y el aprendizaje de las ciencias. Y al mismo tiempo también se muestra en el trabajo cómo puede ser de incompleta la enseñanza que deja un problema, aún correctamente resuelto, si no se apoya en actividades experimentales adecuadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

DISPOSICIONES Y NORMAS MÍNIMAS PARA LA EJECUCIÓN DE INSTALACIONES DOMICILIARIAS DE GAS. Ed. Distribuidora de gas del Centro. Bs.As. 1996.

Raymond Chang. 1995. QUÍMICA. Cuarta Edición. Mc Graw-Hill.

Arnold Reinman. FÍSICA, MECÁNICA Y CALOR - Vol. 1. Ed. C.E.C.S.A.

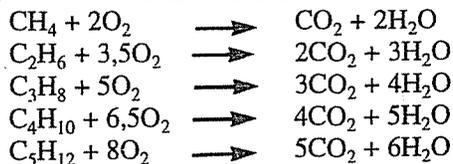
Resnick - Halliday. FÍSICA - PARTE 1. Ed. C.E.C.S.A.

APÉNDICE 1 LOS CÁLCULOS RIGUROSOS

a) Cálculo de la cantidad total de productos formados a partir de la combustión de 1 m³ de gas natural (a 1,000 atm y 15 °C).

Haremos el cálculo para la composición correspondiente a un promedio diario de muestreos, incluyendo los componentes hasta el pentano.

Tomaremos como base las siguientes fórmulas balanceadas de las reacciones:



Componente	masa molar (g)	% molar	componente en 1 m ³ de GN a 1,000 atm y 15 °C		combustión del componente que hay en 1 m ³ de GN a 1,000 atm y 15 °C.		
			moles	kg	kg de O ₂ requeridos	kg de CO ₂ producidos	Kg de H ₂ O producidos
metano	16,0	90,49	38,28	0,6124	2,45	1,684	1,378
etano	30,1	6,011	2,543	0,0765	0,285	0,224	0,137
propano	44,1	0,434	0,184	0,0081	0,029	0,024	0,013
butano	58,1	0,096	0,041	0,0024	0,008	0,007	0,004
pentano	72,1	0,032	0,014	0,0010	0,003	0,003	0,002
Totales					2,775	1,942	1,543

Ahora debemos agregar a los productos un 2,021% molar de CO₂ y 0,895% molar de N₂ en la mezcla inicial, es decir 0,855 moles = 0,038 kg de CO₂, y 0,379 moles = 0,011 kg de N₂, y luego agregar el nitrógeno del aire.

Para simplificar, supondremos que el aire es seco y está compuesto por un 21% molar de O₂ y 79% molar de N₂ (hay un 1% de argón que hemos incluido con el nitrógeno para simplificar). De manera que por cada kg de oxígeno se agregan (79/21) × (28/32) = 3,292 kg de nitrógeno, y ya podemos enunciar la composición de los gases quemados que se obtienen de 1 m³ de GN (a 15 °C y 1,000 atm):

1,543 kg de vapor de agua; que ocupan 2,03 m³ a 15 °C, y 3,26 m³ a 190 °C
 1,942 + 0,038 = 1,980 kg de CO₂; que ocupan 1,06 m³ a 15 °C, y 1,71 m³ a 190 °C
 2,775 × 3,292 + 0,011 = 9,146 kg de N₂; que ocupan 7,72 m³ a 15 °C, y 12,41 m³ a 190 °C
en total 12,70 kg de gases; que ocupan 10,8 m³ a 15 °C, y 17,4 m³ a 190 °C.

(Nótese que el volumen de gases que se obtienen de la combustión de 1 m³ de gas, es independiente de que la presión sea o no 1,000 atm; la masa de esos gases sí dependería de la presión).

b) Cálculo del poder calorífico inferior del GN (a 15°C).

Debemos restar al poder calorífico superior (38,8 MJ/m³ ≅ 9270 kcal/m³) la cantidad de calor correspondiente a la condensación del agua que se produce por la combustión de 1 m³ de GN. Ahora sabemos la cantidad de agua correspondiente: 1,543 kg = 85,72 moles; el calor de condensación de esta cantidad de agua vale: 85,72 mol × 44,4 kJ/mol ≅ 3806 kJ ≅ 909,4 kcal.

De manera que:

$$\begin{aligned} \text{poder calorífico inferior del GN a 15 °C y 1,000 atm:} \\ 9270 - 909 = 8361 \text{ kcal/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{poder calorífico inferior del GN a 15 °C y 726 mmHg:} \\ 8361 \times (726/760) \cong 7980 \text{ kcal/m}^3 \end{aligned}$$

Vemos que no se modifican casi nada los valores que antes estimamos gruesamente en 8343 kcal/m³, y 7970 kcal/m³ respectivamente.

c) Cálculo del calor específico de los gases producto de la combustión.

Podemos calcular el calor específico (a presión constante) de esta mezcla a partir de los valores 2020 J/kg.°C del vapor de agua, 834 J/kg.°C del CO₂, y 1040 J/kg.°C del nitrógeno (valores promedio para el rango de temperaturas 15 °C – 190 °C):

$$2020 \cdot \frac{1,543}{12,70} + 834 \cdot \frac{1,980}{12,70} + 10,40 \cdot \frac{9,146}{12,70} = 1124 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

Vemos que la estimación que hicimos en su momento, de que la mezcla es muy parecida al nitrógeno en su calor específico, no estuvo muy errada. No obstante ahora estamos en condiciones de afinar algunos de los cálculos, tales como el caudal de aire aspirado por los gases al quemarse.

d) ¿Qué se determina a partir de los gases calientes que se van por la chimenea?

Hemos medido un caudal de 9 L/s en la chimenea, a 190 °C, a partir de un ingreso de 0,415 L/s de GN a 15 °C, todo a presión ambiente de 726 mmHg. Ahora podemos decir con más precisión que de la mezcla exacta para combustión completa de esta cantidad de GN, se deben obtener: $0,415 \times 10^{-3} \times 17,4 = 7,2$ L/s de gases a 190 °C y 726 mmHg, de manera que estamos en presencia de la aspiración de un 25% de aire (~1,8 L/s, a 190 °C), y podemos revisar el cálculo de la cantidad de calor empleada recurriendo a estos valores y verificando así la bondad de las aproximaciones hechas.

Para calentar los productos de la combustión: $0,415 \times 10^{-3} \times 12,7 \times (726/760) \cong 5 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$, de calor específico 1124 J/kg·°C, para calentarse de 15 a 190 °C, requieren: $5 \times 10^{-3} \times 1124 \times (190 - 15) \cong 990 \text{ J/s}$

Para calentar 1,8 L/s ($1,4 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$) de aire, de calor específico 993 J/kg·°C, se requieren:

$$1,4 \times 10^{-3} \times 993 \times (190 - 15) \cong 240 \text{ J/s}$$

De manera que en total estamos hablando de $990 \text{ W} + 240 \text{ W} \cong 1,23 \text{ kW} \cong 18 \text{ kcal/min}$, valor que no está muy lejano del $1,15 \text{ kW} \cong 16 \text{ kcal/min}$ estimado antes de una manera burda.

Nota: estos nuevos valores están afectados por tanta incerteza experimental como los anteriores; en ese sentido no pretendemos haberlos corregido. Lo que hemos hecho es, por un lado mostrar cómo se puede hacer el cálculo con todas las variables correspondientes, y por otro mostrar la validez de trabajar con aproximaciones, algo muy necesario en el trabajo escolar.

APÉNDICE 2

LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA Y EL CALOR DE VAPORIZACIÓN DEL AGUA.

Tratando de afinar estos cálculos y buscando valores en tablas, se cae en la cuenta de que el calor de vaporización del agua (a presión constante) varía notablemente con la temperatura: vale aproximadamente 540 kcal/kg a 100 °C, y 589 kcal/kg a 15 °C, (ambos valores a 1,00 atm). El primer valor es el que se suele tener habitualmente para la resolución de problemas en el aula, mientras que el segundo valor, considerablemente mayor, es el que hemos utilizado en este trabajo ($44,4 \text{ kJ/mol} \cong 589 \text{ kcal/kg}$).

Es muy interesante y simple advertir cómo la conservación de la energía implica que la gran variación del calor de vaporización del agua con la temperatura es una consecuencia de la diferencia entre los calores específicos del agua y del vapor, cuyos valores promedio en el intervalo de 0 a 100 °C, son (en particular el calor específico del agua varía menos del 1% en este rango de temperatura):

$$\text{Agua líquida: } C_p(l) \cong 1,00 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Vapor de agua: } C_p(v) \cong 0,46 \text{ kcal/kg}$$

Hagamos un razonamiento simple para mostrarlo.

Consideremos dos estados de una cierta masa de agua:

Estado 1: el agua en estado líquido, a una temperatura t entre 0 y 100 °C, *presión* = 1,00 atm.

Estado 2: la misma agua en estado gaseoso, a 100 °C, y también a $p = 1,00 \text{ atm}$.

Consideremos dos formas de pasar (a presión constante) de 1 a 2:

- a) vaporizando el agua a temperatura t , y luego calentando el vapor hasta los $100\text{ }^\circ\text{C}$.
- b) calentando el agua hasta $100\text{ }^\circ\text{C}$, y luego vaporizándola.

En ambas transformaciones, a, y b, se debe suministrar calor, mientras el sistema almacena energía y realiza trabajo. El trabajo es el mismo en ambas transformaciones, pues en ambos casos vale $p \times (V_2 - V_1)$, independiente de valores intermedios, ya que la presión permanece constante. De manera que como la variación de energía también es la misma porque en ambos casos se parte del mismo estado inicial para llegar al mismo estado final, para ambas transformaciones se requiere suministrar la misma cantidad de calor: $Q_a = Q_b$.

Ahora bien, si llamamos m a la masa de agua en cuestión, y λ_p al calor de vaporización a presión constante (siempre $p = 1,00\text{ atm}$), podremos escribir:

$$Q_a = \text{calor para vaporizar a temperatura } t, \text{ y luego calentar el vapor hasta los } 100\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\equiv \lambda_p(t) \times m + C_p(v) \times m \times (100\text{ }^\circ\text{C} - t)$$

$$Q_b = \text{calor para calentar el agua hasta los } 100\text{ }^\circ\text{C}, \text{ y luego vaporizar a esa temperatura,}$$

$$\equiv C_p(l) \times m \times (100\text{ }^\circ\text{C} - t) + \lambda_p(100\text{ }^\circ\text{C}) \times m$$

Igualando estas expresiones ($Q_a = Q_b$), y eliminando m , obtenemos:

$$\lambda_p(t) \equiv \lambda_p(100\text{ }^\circ\text{C}) + [C_p(l) - C_p(v)] \times (100\text{ }^\circ\text{C} - t)$$

Expresión con la que podemos verificar los valores utilizados, o calcular aproximadamente $\lambda_p(t)$ para otras temperaturas.

APÉNDICE 3

LA EXPRESIÓN PARA EL EMPUJE AERODINÁMICO.

Aunque la Dinámica de los Fluidos es una disciplina compleja, para la cual, si no se es especialista, es muy difícil tener intuiciones que funcionen, a veces es necesario disponer de algunos trucos que permitan realizar estimaciones.

En este caso, y sólo a los fines de estimar gruesamente el empuje sobre una superficie perpendicular a la corriente de un fluido, hemos recurrido al siguiente tratamiento.

Supongamos que el fluido consiste en una nube de n partículas de masa m por unidad de volumen, inmóviles entre sí, desplazándose con velocidad \vec{v} a lo largo del eje z elegido perpendicular a la superficie, y supongamos que estas partículas van transfiriendo totalmente su momento lineal $\vec{p} = m\vec{v}$ a la superficie al chocar con ella (por ejemplo, como si quedaran pegadas a la superficie, o al menos, como si se desviarán paralelamente a ella, anulándose totalmente la componente z de su velocidad).

En esta aproximación, apliquemos la ley dinámica fundamental $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$, a lo largo del eje z . Evaluemos Δp_z : variación total de mv_z de todas las partículas que chocan con S en Δt .

Las partículas que chocan con S en Δt son las que están en el cilindro de base S y altura $v \Delta t$, (es decir, son: $N = nSv\Delta t$) y todas pasan de tener momento lineal $p_z = mv$, a tener momento lineal $p_z' = 0$, de manera que:

$$\Delta p_z = N m v = n S v \Delta t m v = n m S v^2 \Delta t,$$

y la fuerza ejercida vale: $F = n m S v^2 = \delta S v^2$; en donde $\delta = nm$ es la densidad del gas.

Si ahora consideramos que sólo algunas partículas transfieren todo su momento lineal al obstáculo, y que la mayoría lo hace parcialmente, aunque algunas transfieren más al rebotar, debemos multiplicar la expresión por algún coeficiente de forma α , cuyo valor podría estar más o menos entre 1 y $1/2$.

Este tratamiento funciona muy bien siempre que pueda despreciarse la viscosidad; puede aplicarse por ejemplo a la caída de gotas de lluvia (gotas grandes, no de niebla, para las cuales puede resultar dominante la viscosidad), a la resistencia opuesta por el aire a la marcha de vehículos o proyectiles, etc.