



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Trabajo fin de grado

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE LOS ARCONES FRIGORÍFICOS

Alumno: Juan Carlos Romero Montero

Tutor: Jose Alberto Moleón Baca

Dpto: Departamento de Física

Contenido

1. Introducción.....	3
1.1 Origen del proyecto	3
1.2 Objeto del proyecto.....	3
1.3 Alcance del proyecto.....	4
2. Metodología.....	5
3. El elemento principal	6
4. Sistema actual.....	9
4.1 Capacidad.....	10
4.2 Alcance	11
4.3 Mediciones del sistema.....	12
4.3.1 Puesta en marcha	13
4.3.2 Enfriamiento de una botella sin carga	14
4.3.3 Enfriamiento de la carga completa.....	15
4.3.4 Perdidas de calor por uso	16
4.4 Ventajas y desventajas	17
5. Sistema en cadena (FIFO)	18
5.1 Movimiento de la botella	19
5.1.1 Por gravedad.....	19
5.1.2 Eléctrico	20
5.1.3 Acción manual.....	21
5.2 Diseño.....	22
5.3 Control de la temperatura	23
5.4 Cálculos	24
5.4.1 Capacidad	24
5.4.2 Carga frigorífica.....	25
5.4.3 Máquina frigorífica.....	30
5.4.4 Flujo de calor.....	33
5.4.5 Tiempo de enfriamiento.....	38
6. Refrigeración por agua	42
7. Simulación de caso real	44
8. Conclusiones.....	44
9. Bibliografía	46

1.Introducción

1.1 Origen del proyecto

A lo largo de la historia las personas han buscado métodos de refrigeración que les permitiera almacenar y conservar la comida que tanto trabajo les había costado obtener. Ya en la prehistoria se usaban cuevas frías o agujeros en el suelo repletos de nieve que después de un tiempo formarían hielo para ser usado en las épocas de más calor.

En el antiguo Egipto tenían la costumbre de producir hielo dejando, durante la noche, una vasija poco profunda con una fina capa de agua apoyada sobre paja que la aislaba del calor de la tierra y poder formar pequeños cristales de hielo.

Y así, poco a poco, desde las mezclas refrigerantes con éter etílico y los descubrimientos de las propiedades termodinámicas de elementos como el dióxido de carbono o el amoníaco llegaron a la refrigeración mecánica en el siglo XIX de la mano de Jhon Gorrie, el cuál inventó una máquina para bajar la temperatura de las habitaciones de los enfermos de fiebre amarilla [1].

Hoy en día todos tenemos una máquina frigorífica en casa, lo que considero realmente necesario para la conservación de alimentos ya que sin ellos la proliferación de bacterias y la oxidación de las grasas en frutas, verduras, carnes y pescados haría de ellos un desecho en cuestión de horas.

Pero no es en la necesidad de conservación donde se centra mi trabajo sino en el placer de tomar las bebidas frías, en concreto la cerveza. Este proceso no es algo rápido y son muchas las veces que nos encontramos en un restaurante en el que ya se han consumido todos los botellines fríos que les quedaban, teniendo que esperar a que se enfríen o teniendo que tomar cualquier otra bebida.

1.2 Objeto del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es mejorar a nivel de restaurante, pubs y discotecas el sistema de enfriamiento que siguen actualmente, siendo este un apilamiento en neveras horizontales de toda la carga a enfriar horas antes de la apertura del negocio.

Mi idea y su desarrollo consiste en modificar este apilamiento que te ofrece un número limitado de botellas por un sistema en cadena que recorra el interior de la nevera componiendo un ciclo de enfriamiento cuyo único límite sea el stock del producto.

Para ello voy a diseñar en Catia, un programa de modelado 3D, un sistema de railes que conduzca mi botella por el interior de las neveras que las fábricas de cerveza les ofrece a bares y restaurantes, voy a estudiar los tiempos de enfriamiento que necesita cada botella para alcanzar una temperatura óptima de servicio, la potencia que requiere la nevera para soportar la carga calórica y la transmisión de energía a través de elementos como el vidrio para determinar si es un proyecto viable o no.

1.3 Alcance del proyecto

Se comenzará por un análisis de las capacidades actuales de la nevera en un régimen de apilamiento, midiendo el tiempo que requiere para enfriar tanto una única botella como la carga al completo y expresando las ventajas y desventajas de este sistema.

Continuaremos con la valoración de los distintos diseños que podemos desarrollar para el recorrido del envase a lo largo del interior de la nevera.

Introduciremos mejoras a nivel de control de temperatura para que se realice de la forma más eficiente el enfriamiento de nuestras botellas.

Estudiaremos los datos recogidos de los experimentos para una mayor objetividad de los resultados, ya que la teoría puede diferir de la práctica.

Y finalmente alcanzaremos unas conclusiones ya sean tanto a favor como en contra de la idea base de este proyecto.

2. Metodología

Para el diseño de las neveras es crucial el uso de softwares 3D que muestran interferencias, choques, volúmenes y movimientos que de otra forma no hubieran sido posibles.

El material utilizado para la toma de datos han sido unos termómetros digitales, del departamento de Física, capaces de registrar en una tarjeta de memoria valores de temperatura con 3 decimales de exactitud en unos rangos de tiempo desde milisegundos hasta horas, con intervalos regulables.

Esto junto a un arcón frigorífico y neveras verticales han sido los instrumentos utilizados durante el desarrollo del experimento.

Los datos recogidos por los termómetros se han importado a gráficas de Excel haciendo más sencilla la interpretación de los mismos.

3. El elemento principal

El envase más común para este tipo de bebida es el de vidrio de 33cl de capacidad, comúnmente denominado tercio, con la medida estándar que se indica a continuación:

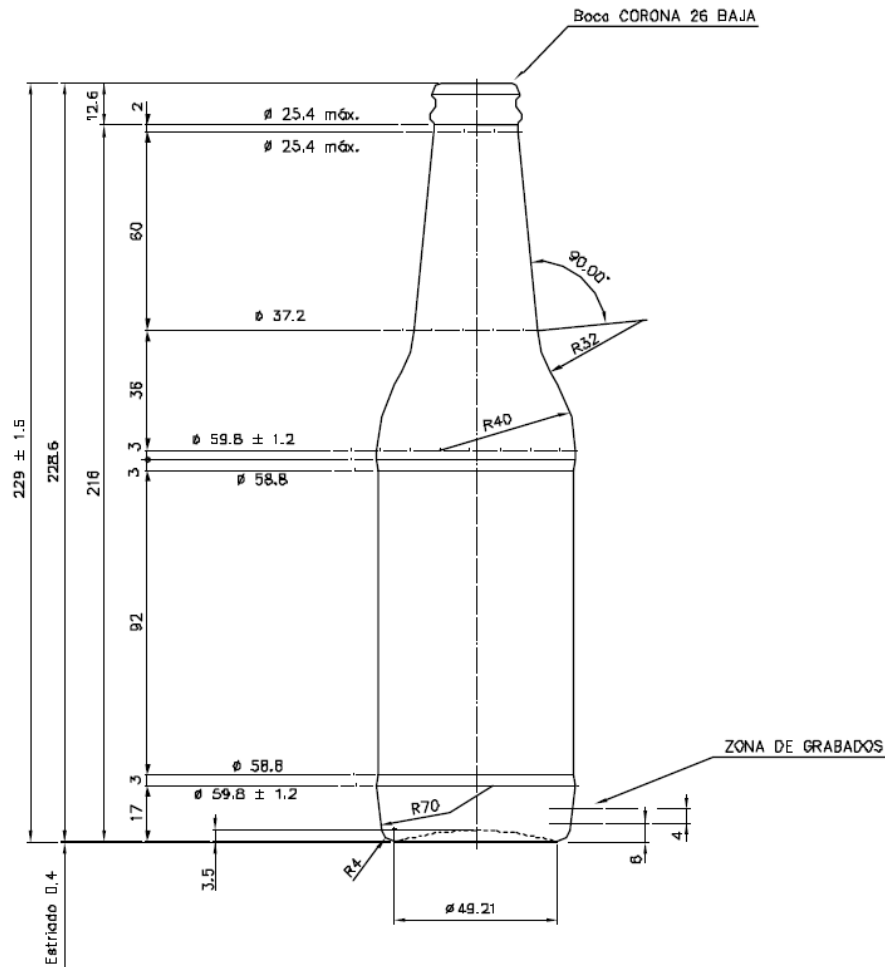


Ilustración 1. Medidas botella 33cl [7].

Esta no es la única forma que puede adoptar el envase, sino que hay miles de estilos diferentes aunque la capacidad sea la misma, un ejemplo son las siguientes botellas:



Referencia	4294	3760	577/364	1530	Praga
Capacidad	33 cl	33 cl	33 cl	33 cl	33 cl
Altura (mm)	227	226,5	238	229	215
Diámetro (mm)	51	60,4	61	49,21	71,9
Color:	Topacio	Transparente	Topacio Oscuro	Verde	Topacio Oscuro
Peso (gr)	242	225	275	230	300
Boca	Corona 26 mm	Corona 26 mm	Corona 26 mm	Corona 26 mm	Corona 26 mm

Ilustración 2. Diferentes modelos de envases [8].

Como podemos ver, aunque todas tienen distintas alturas y diámetro, coinciden en la capacidad y en el diámetro de la boca.

Este envase puede ser tanto de refrescos como de bebidas alcohólicas, centrandolo este estudio en la cerveza, entre otras razones por ser la bebida más vendida a nivel de bares.

Dentro de lo que es la cerveza nos encontramos con multitud de tipos diferenciadas entre ellas por el tipo de cebada y malta que usen, la temperatura a la que la levadura haya realizado su fermentación, el tiempo de maduración, etc. Encontrándonos con cervezas tipo Ale, Lager, IPA, APA, Porter, Stout, Lambic [2]... Siendo la Lager el tipo de cerveza más consumida en España y el mundo.

La temperatura óptima de servicio para este tipo se encuentra entre los 4 y 6 grados centígrados como muestra la siguiente tabla:



Ilustración 3. Temperatura de servicio [8].

Para asegurarnos que nuestra cerveza se encuentra a una temperatura optima y se mantiene fría durante más tiempo vamos a establecer un máximo de 4,5°C para poder ser servida.

4. Sistema actual

El mueble frigorífico con el que vamos a trabajar está especialmente indicado para el enfriamiento de botellas y productos envasados.

Este botellero está fabricado en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Siendo la encimera de acero inoxidable y el aislamiento de poliuretano expandido. El sistema frigorífico se encuentra en la parte inferior del mueble, debidamente protegido.

Los materiales usados en su fabricación aseguran un grado alto de aislamiento, lo que resulta en un gasto reducido de electricidad.

El mueble está fabricado evitando recovecos y aristas que puedan almacenar suciedad, facilitando su limpieza.

El refrigerante normalmente usado en estas unidades es el R-134a, siendo un gas ecológico respetuoso con el medio ambiente.



Ilustración 4. Nevera estándar [9].

Hoy en día todos los bares cuentan con este tipo de neveras para sus bebidas. Éstos se rellenan de botellas después de cada turno de trabajo para poder servir las bebidas a una temperatura adecuada en el siguiente turno, ya que requieren varias horas para alcanzar el equilibrio térmico con la nevera.

En este apartado vamos a estudiar sus características para compararlas a posteriori con el resto de las alternativas.

4.1 Capacidad

Para medir la capacidad de la nevera hemos tomado las medidas de nuestro modelo y hemos representado la sección transversal en Catia, dibujando circunferencias que representan las botellas y que se encuentran apiladas de la forma óptima.

Partiendo de una nevera rectangular con espacio útil interior de 93 cm de largo por 45,7 cm de fondo y 47,5 cm de alto y considerando que la altura máxima de almacenaje definida por el fabricante es de 30,5 cm desde la base, la capacidad teórica resulta de 35 botellas por columna, que, multiplicado por 4 columnas, nos da una capacidad de 140 botellas en total.

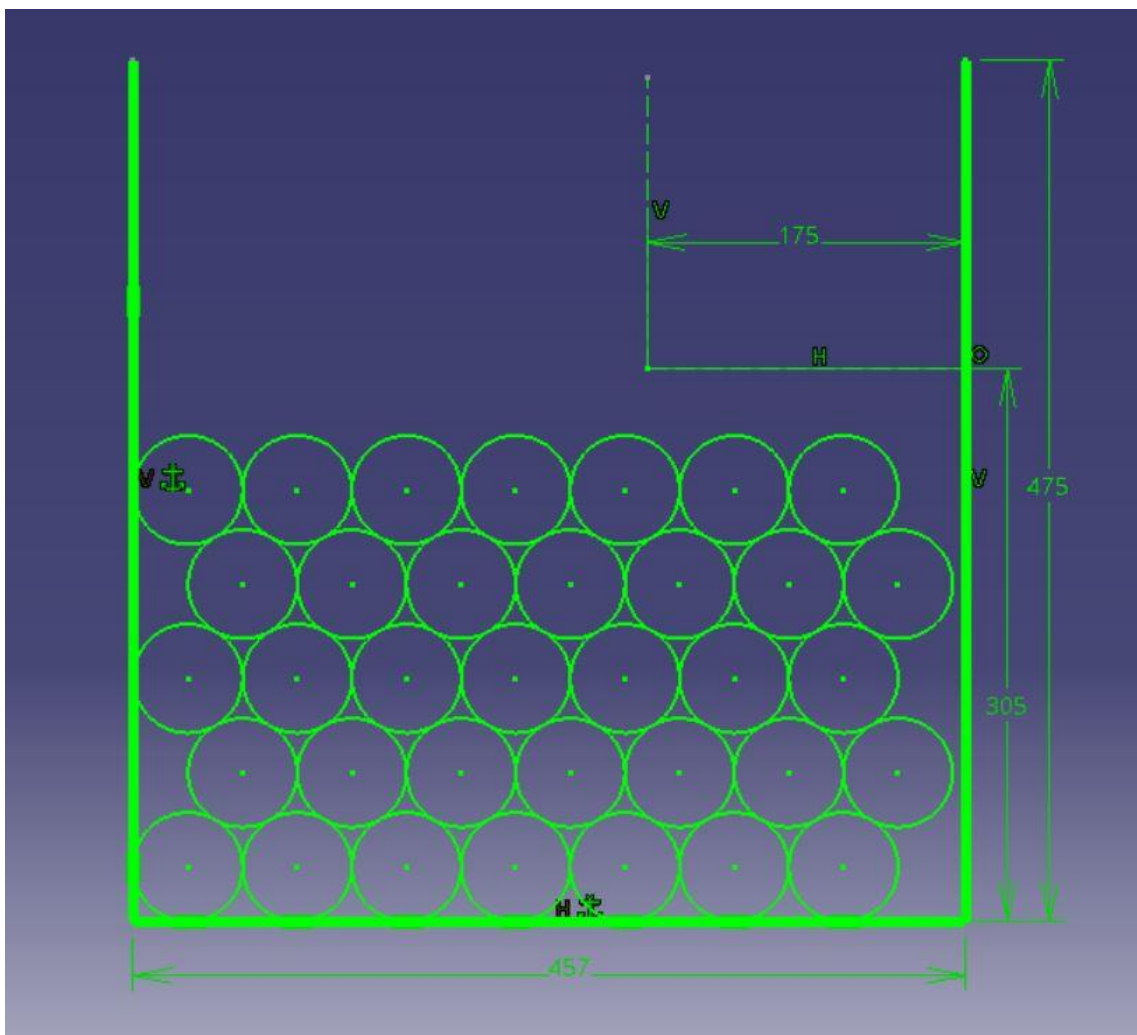


Ilustración 5. Esquema capacidad 1

Normalmente estos botelleros son rellenados por encima del límite establecido, así que siendo realistas añadiremos 11 botellas más por columna, lo que nos deja una capacidad para 200 de estos envases.

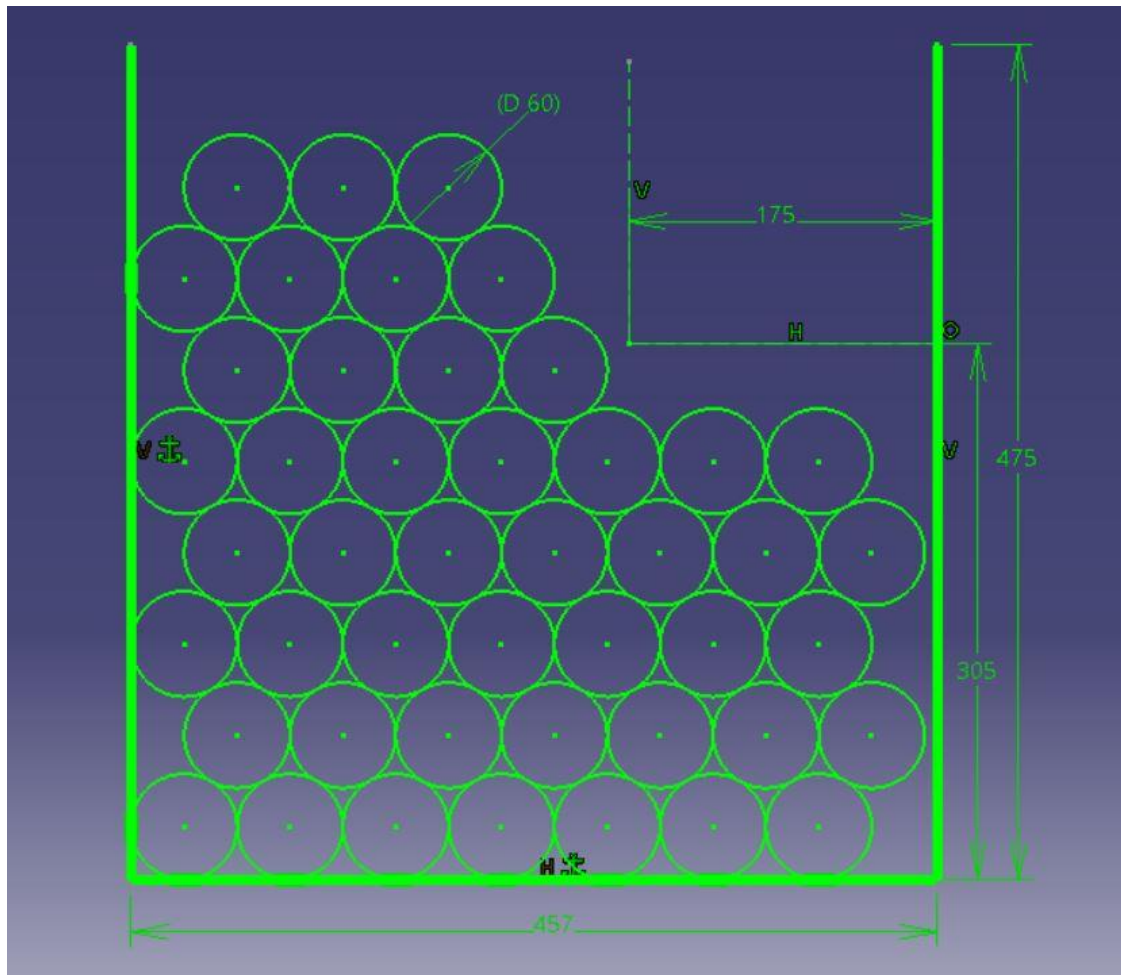


Ilustración 6. Esquema capacidad 2

4.2 Alcance

Vamos a definir el alcance como el tiempo máximo que la nevera nos va a proporcionar bebidas frías. Esto depende directamente del consumo medio de botellas en el local objeto de estudio y está relacionado con el tipo de actividad, ya que no se consume de igual manera en un restaurante, un pub o una discoteca. Como el consumo depende del tipo de negocio vamos a realizar los cálculos para diferentes valores, desde un consumo de una botella por minuto

para kioscos pequeños hasta nueve botellas por minuto más propio de verbenas y discotecas.

Con el modelo actual el cálculo es sencillo, ya que solo hay que dividir su capacidad (200 botellas) entre la supuesta demanda que pueda tener por minuto.

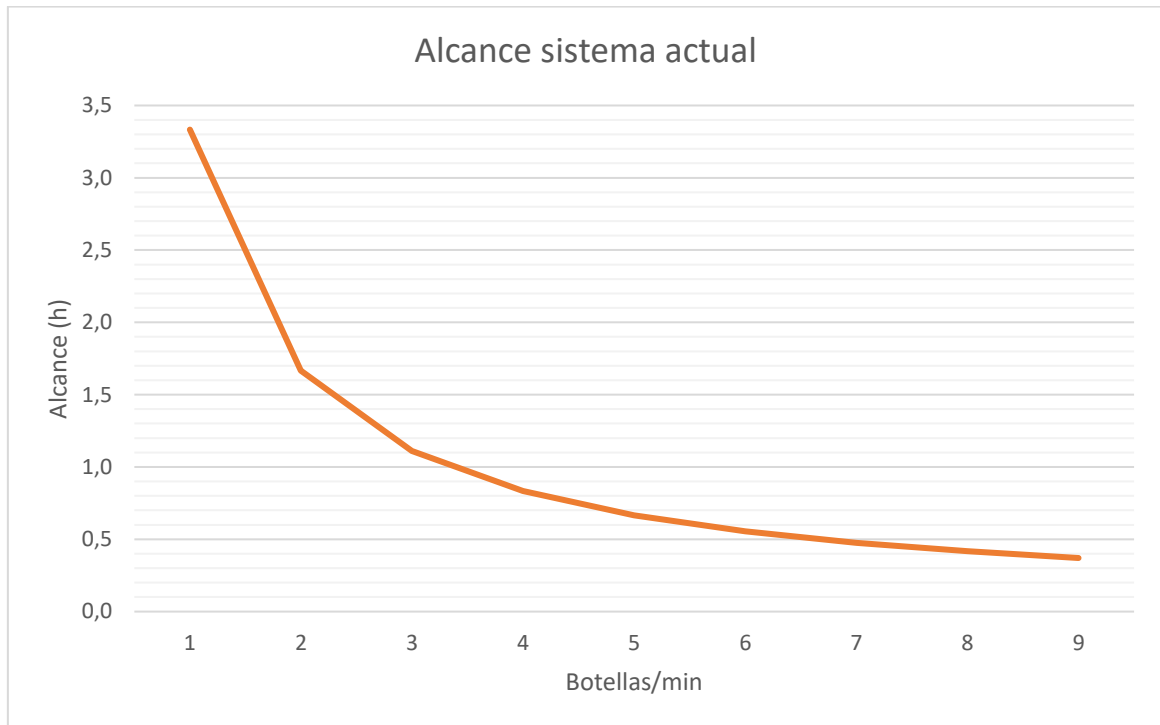


Ilustración 7. Alcance del sistema

Con un consumo de una botella por minuto, podríamos estar sirviendo cerveza durante poco más de tres horas. Este alcance se reduce drásticamente con valores de tres y cuatro botellas por minuto con el que nos encontramos una autonomía de aproximadamente una hora.

4.3 Mediciones del sistema

Con la ayuda de una nevera del mismo estilo y dos termómetros digitales de la marca Phywe complementados con sensores Cobra hemos podido extraer la siguiente información sobre el funcionamiento y los tiempos de enfriamiento del aparato en cuestión.

4.3.1 Puesta en marcha

Estas medidas fueron tomadas durante el mes de enero en una nave industrial por lo que la temperatura ambiente se encuentra por debajo de la temperatura en la que normalmente trabajaría este dispositivo.

Con todo el sistema a cero y a una temperatura ambiente de 13°C, ponemos el botellero en marcha a su máxima potencia, esto no quiere decir que vaya a enfriar más rápido, sino que el termostato integrado en la nevera permitirá que ésta funcione hasta alcanzar una temperatura límite menor, en el orden de los -8°C.

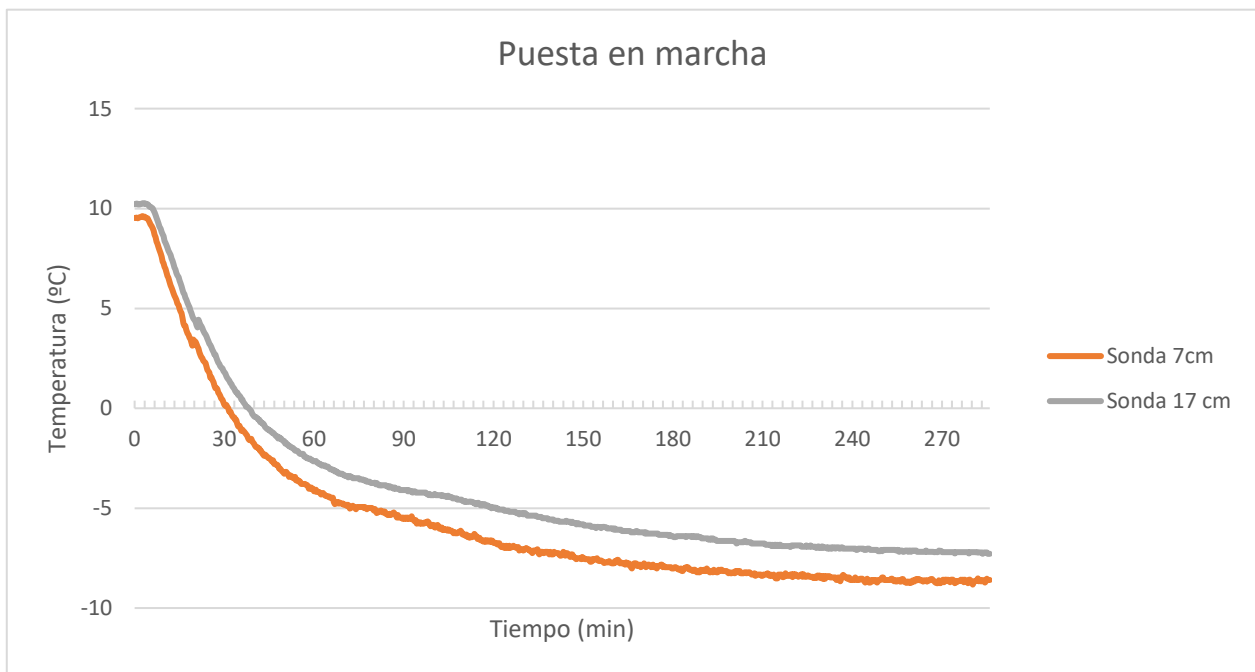


Ilustración 8. Gráfica puesta en marcha

La gráfica muestra el gradiente de temperatura desde su puesta en marcha hasta las 4,6 horas de funcionamiento. La línea grisácea y la naranja representan la temperatura a 17 y 7 cm de la base respectivamente. Esto nos muestra que la variación de temperatura en función de la altura es un dato importante a tener en cuenta en estudios posteriores.

Como puntos interesantes vemos que alcanza los 0°C en 31,33 min y un mínimo de -8,7°C en 244,3 min o lo que es lo mismo, 4 horas.

4.3.2 Enfriamiento de una botella sin carga

En esta otra medición hemos tomado una botella rellena de agua con un tapón de corcho al que a través de un orificio se ha introducido una sonda para medir la temperatura del líquido. Otra sonda en contacto con el cristal nos dará la temperatura exterior del envase.

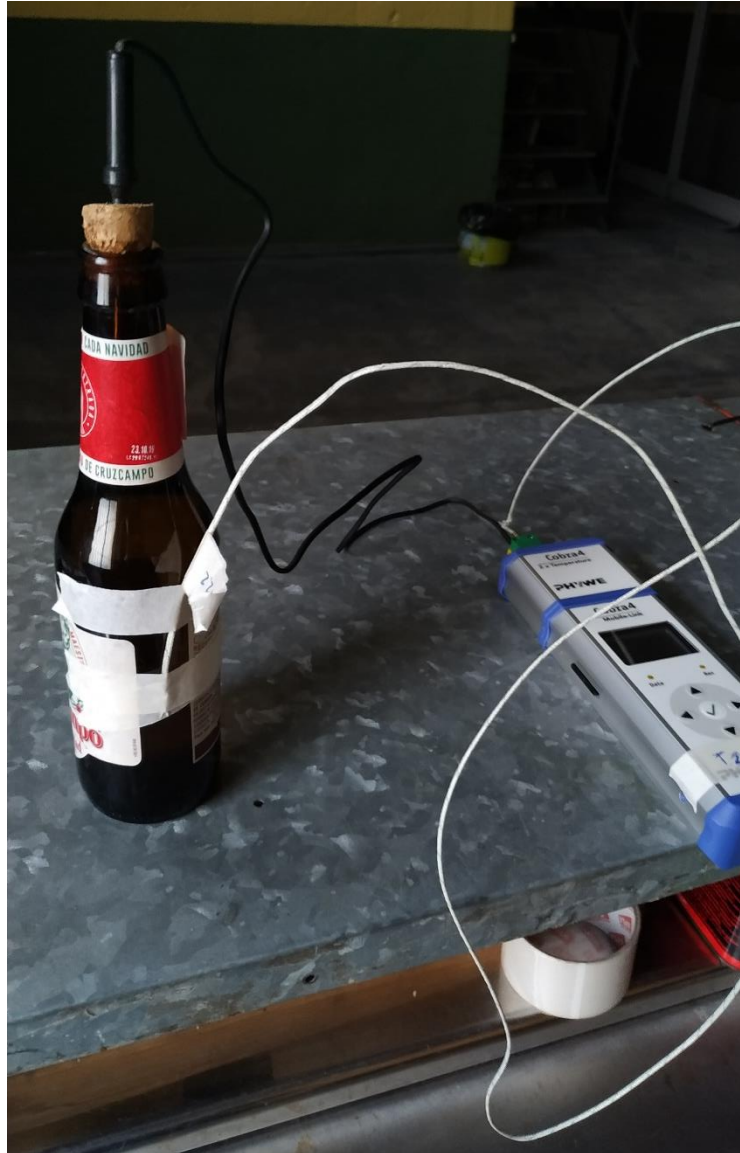


Ilustración 9. Elementos del estudio

Y al igual que en la medición anterior, dos sondas más nos dan la temperatura de la nevera a 7 y 17 cm respecto de la base de la nevera. Todo esto con la nevera a una temperatura de trabajo media de $-2,5^{\circ}\text{C}$ y siendo esta botella su única carga.

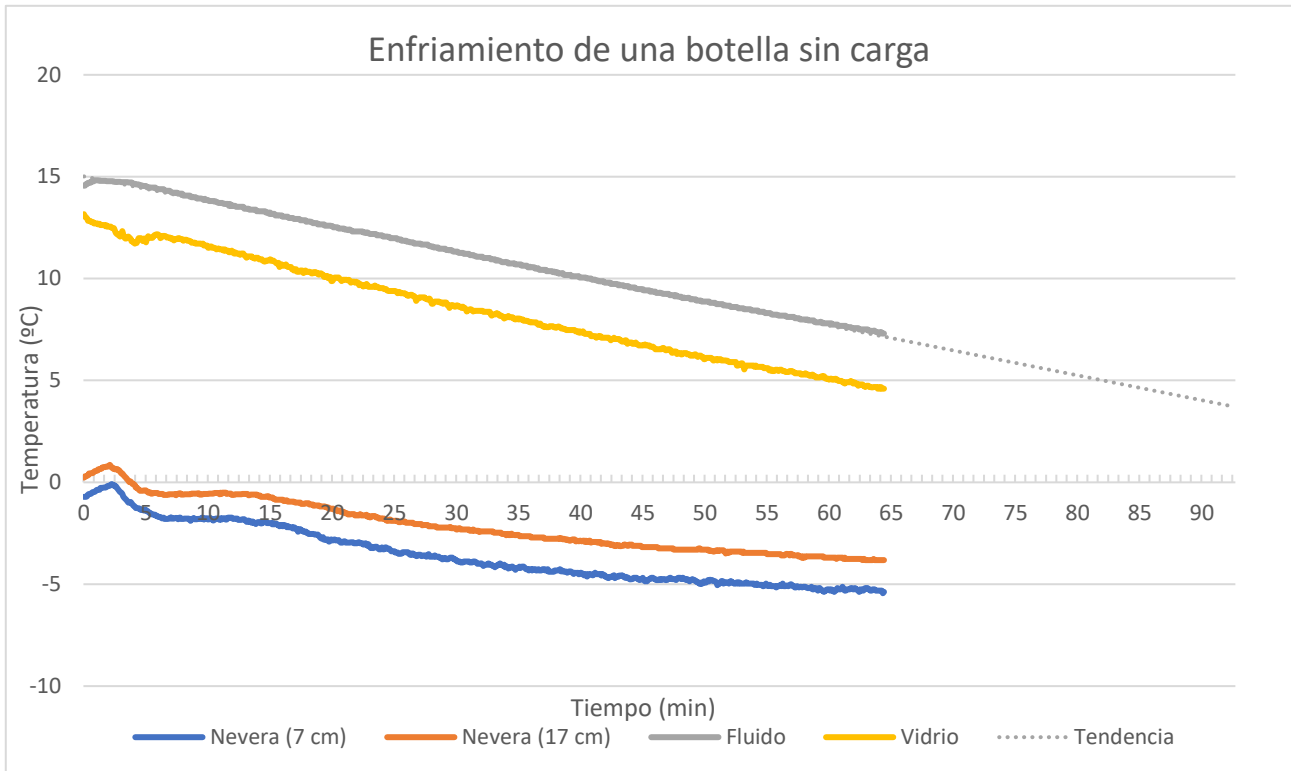


Ilustración 10. Gráfica enfriamiento sin carga

Tomando como temperatura objetivo del fluido los 4,5°C sugeridos para su consumo, creamos una línea de tendencia ya que nuestros termómetros presentan una limitación debido a las baterías y concluimos que tardaría aproximadamente 85 minutos en disminuir su temperatura en 10°C.

4.3.3 Enfriamiento de la carga completa

En esta nueva medición se completó la nevera con la botella del estudio anterior además de varias garrapas de agua, en total 50 litros de agua que representan la carga de unas 160 botellas de 33cl, todas ellas a temperatura ambiente para simular con mayor precisión una situación real de enfriamiento.

Los datos tomados se reflejan en el siguiente gráfico:

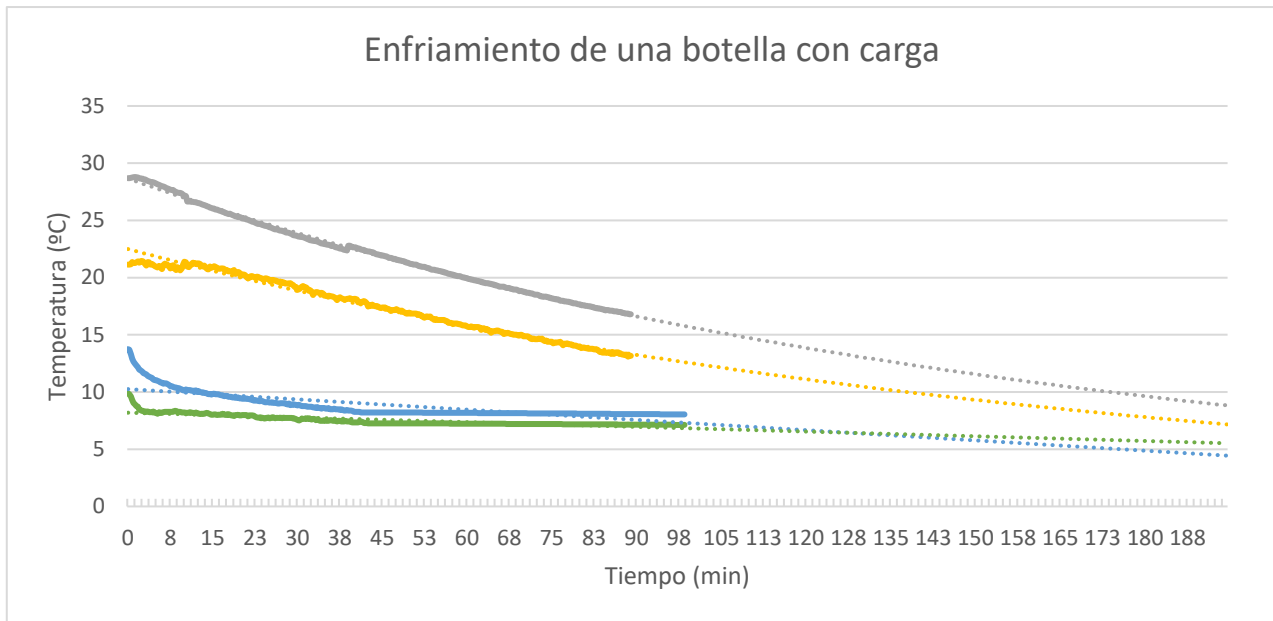


Ilustración 11. Enfriamiento de una botella con carga

De estos datos podemos concluir que para disminuir la temperatura de una carga completa en 15 grados han sido necesarias unas 2 horas aproximadamente ya que nuestros termómetros dejaron de funcionar a la hora y media de funcionamiento por las limitaciones en su batería. Aún así, la línea de tendencia exponencial nos aproxima a la realidad.

Con esta información calcularemos más adelante la eficiencia de nuestra nevera.

4.3.4 Perdidas de calor por uso

Un elemento muy importante a tener en cuenta en este sistema es que las puertas superiores están en constante movimiento ya que es la única forma de acceder al interior. Cada vez que la puerta se abre hay un intercambio de calor que hace que aumente la temperatura de la nevera.

Para ello hemos medido y representado las pérdidas de calor que supondría estar abriendo y cerrando la nevera para extraer las botellas.

En la gráfica se muestra como varía la temperatura en función de la altura y el tiempo, habiendo realizado 4 aperturas de 2 segundos cada una.

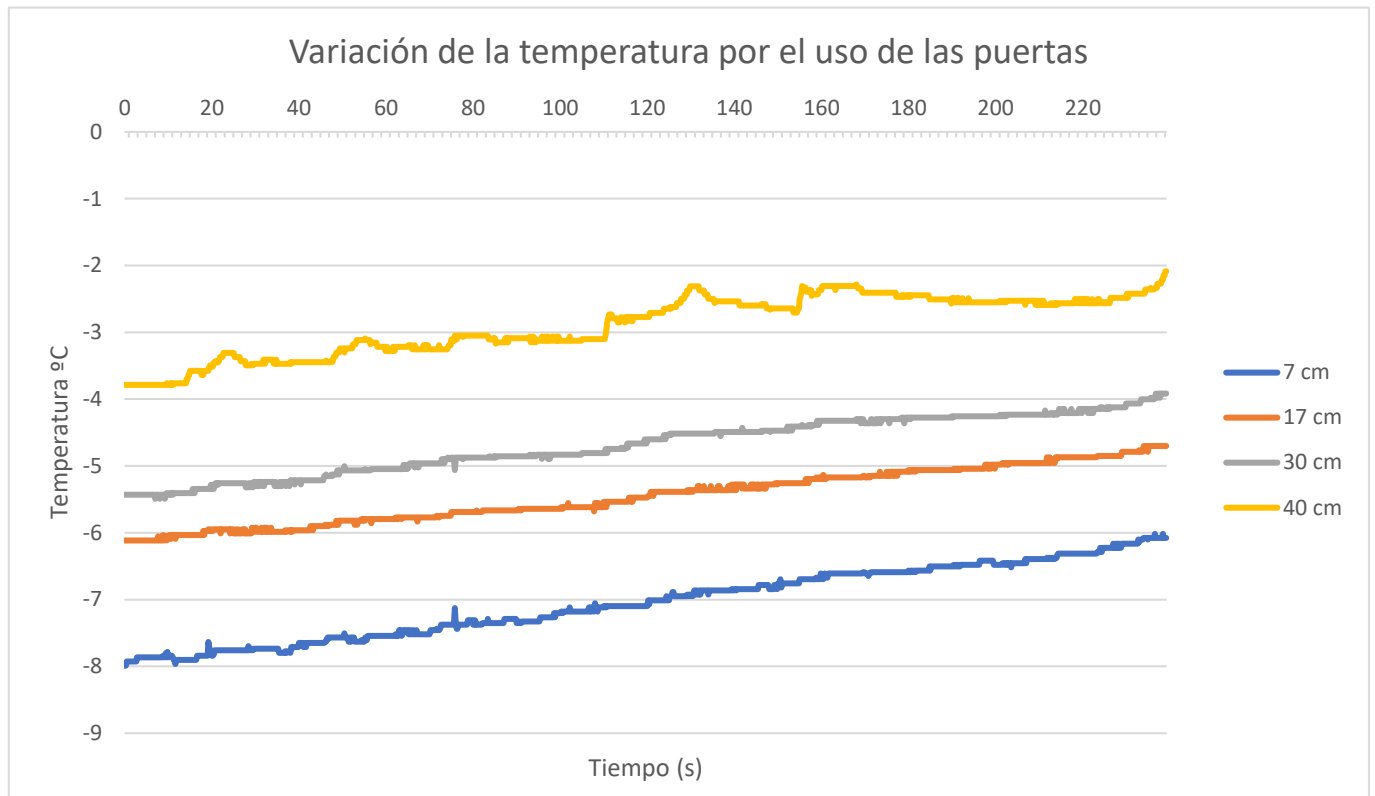


Ilustración 12. Variación de la temperatura por el uso de las puertas

Aquí podemos ver como se ve afectado en mayor medida la parte superior ya que se encuentra más próxima a la bandeja de salida. Además, el gradiente de temperaturas en función de la altura queda perfectamente retratado, pasando de -8°C a -4°C en unos escasos 33 cm, lo que nos da una variación de 0,12°C por cada cm que ascendamos.

Pasados 238 segundos (4 min) la temperatura media de la nevera ha subido 2°C debido a la actividad de la bandeja, ésta seguirá subiendo hasta que cese su apertura o se alcance el equilibrio con la temperatura ambiente.

4.4 Ventajas y desventajas

El método de carga usado es de apilamiento o técnicamente denominado sistema FILO (First Input, Last Output), y tiene grandes desventajas:

- El último elemento en entrar en la nevera será el primero en salir, haciendo de éste el sujeto que determine el tiempo mínimo que deben permanecer todos los elementos restantes en el interior de la nevera.
- Resulta inviable su carga durante el servicio ya que los nuevos elementos deberían apilarse al fondo del botellero, lo que supone mover el resto de los envases.
- Incluso cargándolo durante el servicio no es seguro, que cuando se alcancen de nuevo, estén a la temperatura correcta.
- Los repetidos movimientos de apertura y cierre de la compuerta superior hacen que el calor entre en el botellero, subiendo los niveles de temperatura como ya hemos visto.
- Al ser una bandeja móvil, el nivel de aislamiento es relativamente bajo respecto a otras neveras con cierre de tira magnética.

En cuanto a ventajas:

- Sistema sencillo y sin complicaciones.
- Fácil de limpiar
- Mayor capacidad

Pero ¿Cuál es mi propuesta?

5. Sistema en cadena (FIFO)

La idea principal es que la botella haga un recorrido zigzagueante de arriba a abajo por el interior de la nevera para posteriormente salir a través de una apertura situada en la parte frontal inferior del baúl. Además, este sistema se abastecerá automáticamente desde el exterior por un sistema similar al empleado en las máquinas de refrescos. Las dudas que me surgen son, ¿Cuánto disminuye la capacidad con este sistema? ¿Le dará tiempo a la botella a enfriarse durante el recorrido? ¿Qué cantidad de calor se transmite por unidad de tiempo a través de las paredes de la botella?

Conforme avanzamos en el proyecto se van resolviendo dudas y apareciendo otras muchas, así que vamos por orden.

5.1 Movimiento de la botella

Para el movimiento de la botella se han barajado distintas opciones, descartando aquellas en las que la gravedad actuara en nuestra contra ya que no sería beneficioso añadir fuerzas contrarias al sentido del recorrido de la botella.

Las botellas se deberán mantener horizontales y paralelas a la pared frontal por comodidad a la hora de su entrada, salida y por el aprovechamiento del espacio.

Para que sea más fácil de comprender, nos apoyaremos en unos croquis de los diferentes modelos:

5.1.1 Por gravedad

Para el transporte de las botellas se había pensado en primera instancia, en una simple lamina metálica por la que éstas se pudieran deslizar hacia abajo por los diferentes escalones. Las botellas contiguas se mantendrían en contacto entre sí limitando las posibles rotaciones que pudieran atascar el sistema, pero en el caso de las primeras botellas introducidas, este contacto no existiría, dejando al libre albedrío sus movimientos.

Para solucionar esto, pensé en algo parecido a una cinta transportadora con surcos en los que apoyar el culo de la botella y que controlaran estos movimientos. Mientras que el cuello de la botella se apoyara en un rail metálico que lo mantuviera horizontal.

La fuerza de movimiento de la cinta sería ejercida por el propio peso de las botellas, mientras no se extrajese ninguna, no habría movimiento en el interior. Uno de sus problemas es que el espacio bajo la pendiente quedaría inutilizado, reduciendo la capacidad considerablemente.

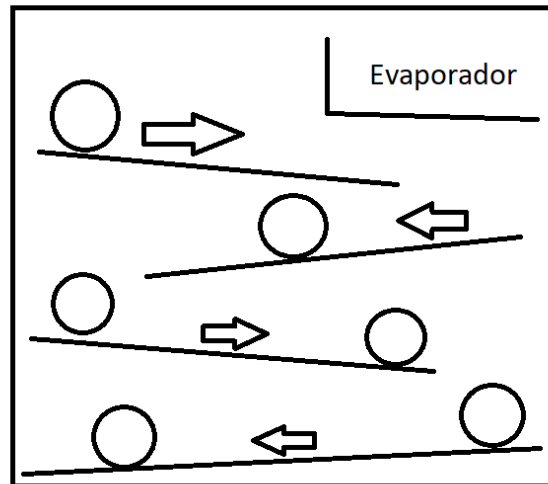


Ilustración 13. Diseño por gravedad.

5.1.2 Eléctrico

Aquí la idea era que el movimiento de las cintas se ejerciera mediante pequeños motores y que a través de un pulsador, se desplace la distancia equivalente al número de botellas que se han retirado de la nevera. Por ejemplo,

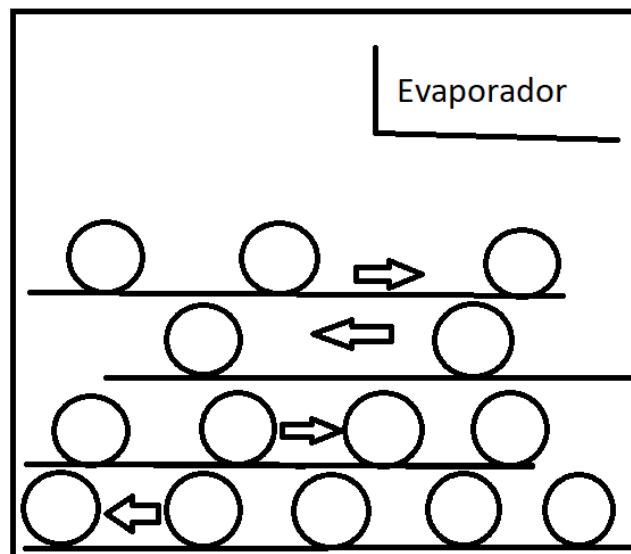


Ilustración 14. diseño eléctrico

un botón en el exterior desplazaría el equivalente al diámetro de una botella cada vez que se pulsara, expulsando una botella por abajo y dejando hueco en el interior para que entrara una nueva.

Este sistema resuelve la pérdida de almacenamiento que se presenta en el modelo por gravedad pero a su vez eleva el coste de la instalación, complejidad y mantenimiento e introduce fuentes de calor en el interior de la nevera.

5.1.3 Acción manual

Optaremos por un sistema zigzagueante que aproveche al máximo el espacio y que se accione manualmente desde el exterior de la nevera a través de una palanca. Tenemos que tener en cuenta el hueco del evaporador ya que la idea es modificar la nevera lo mínimo posible.

En el siguiente sketch de Catia se muestra el recorrido y como quedaría el apilamiento de las botellas en el interior de la nevera. La capacidad aquí es de 40 botellas, siendo el total con las 4 columnas de 160 botellas, 40 menos que en el sistema tradicional.

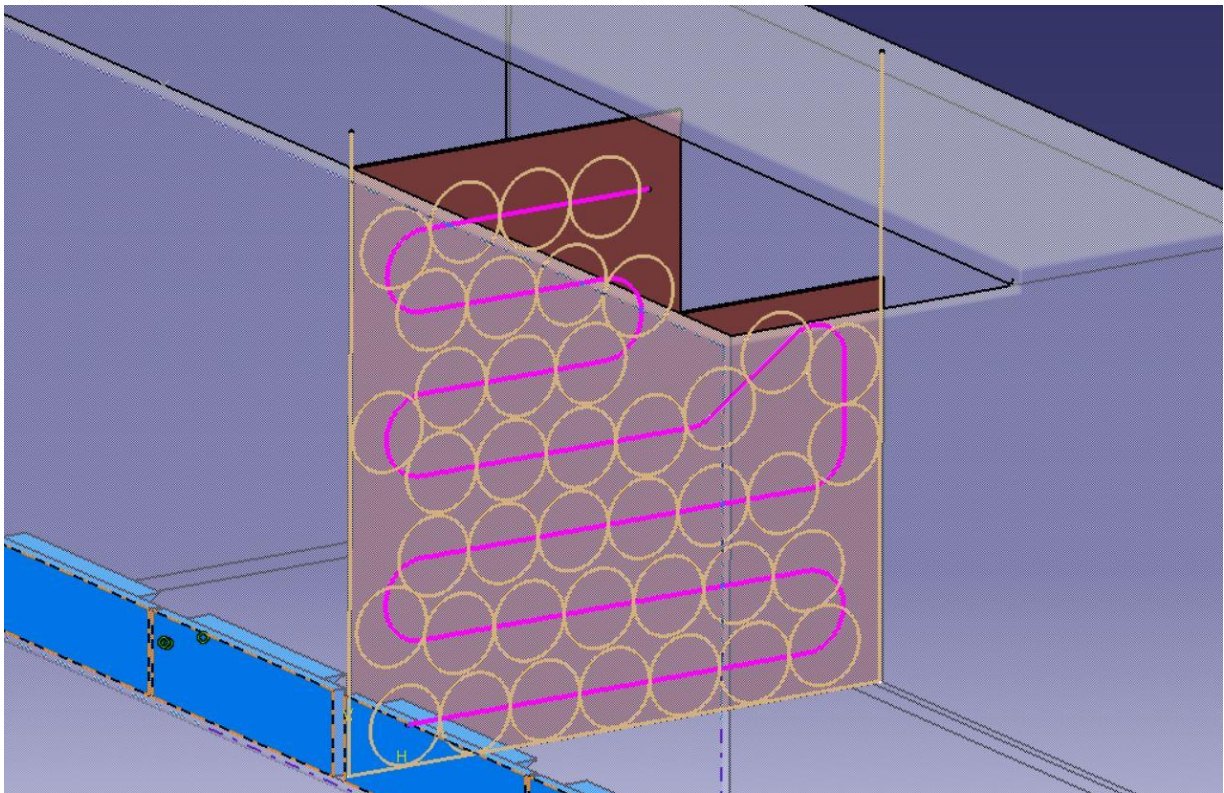


Ilustración 15. Sketch disposición

5.2 Diseño

Pensando en la versatilidad del sistema para que funcione con distintos tamaños de envase, y sabiendo que todos los envases tienen algo en común como es el diámetro y forma de la corona, diseñaremos algo similar a una pinza que abrace el cuello de la botella y la conduzca a lo largo de todo el recorrido.

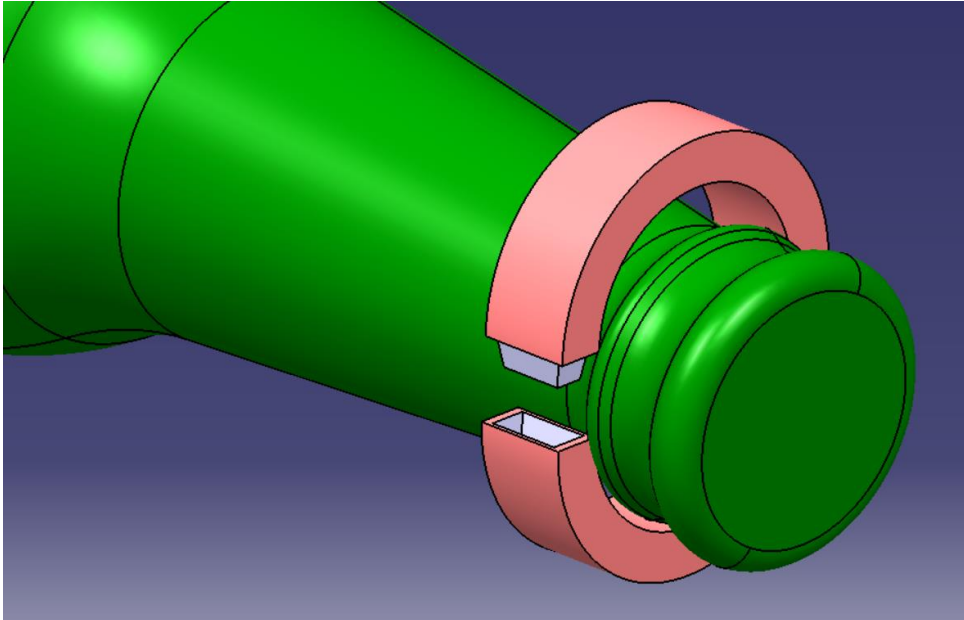


Ilustración 16. Sistema de abrazaderas

Estas abrazaderas recorrerán el circuito constantemente por el interior de unos railes, transportando las botellas desde la entrada superior, donde lo recogen, hasta la escotilla inferior, donde lo sueltan, eliminando por completo los grados de libertad de movimiento que pudiera tener el envase.

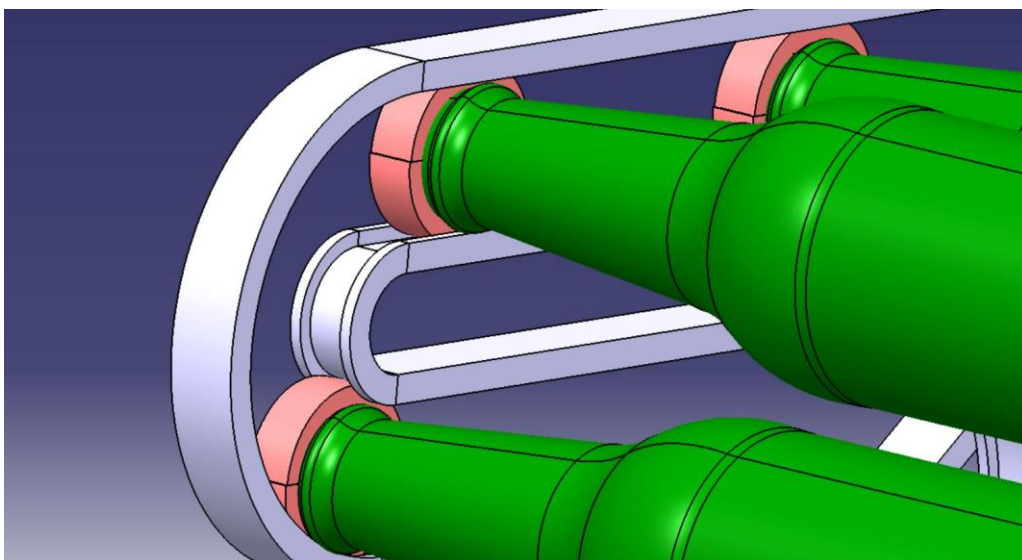


Ilustración 17. Railes y abrazadera

Ya solo nos quedaría diseñar un sistema de salida para las botellas con el que no se perdiera demasiado calor ya que el aire frío, al ser más denso, se sitúa en la zona inferior por donde vamos a situar nuestra escotilla.

Estas compuertas pivotan cuando el envase hace presión desde el interior, dándole accesibilidad y sellando la apertura tras de sí hasta que éste sea recogido.

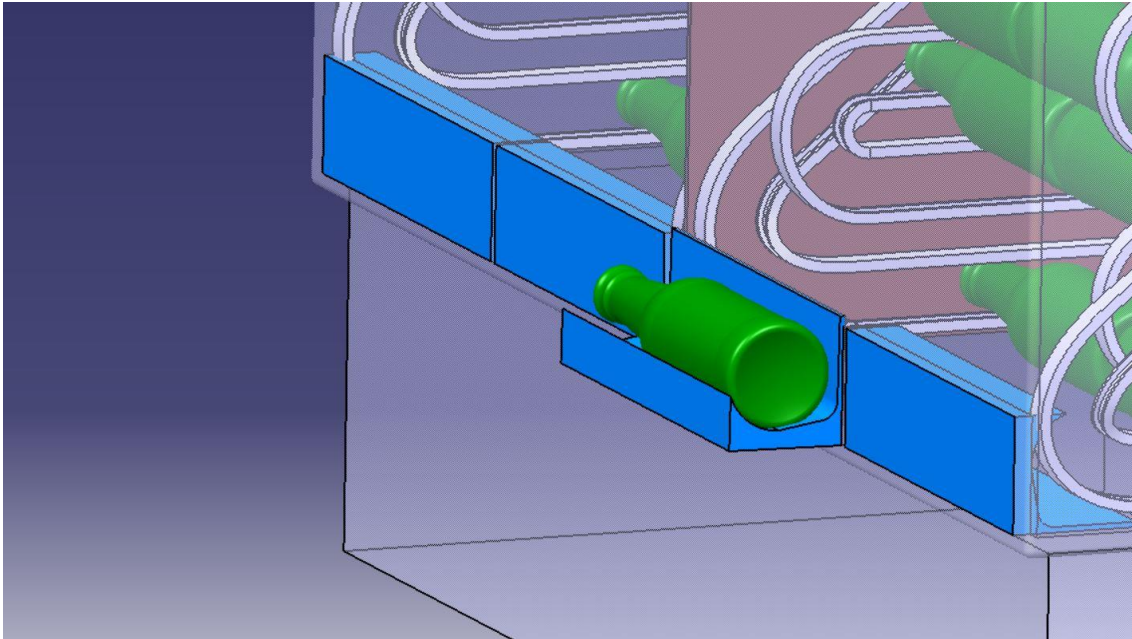


Ilustración 18. Escotilla

5.3 Control de la temperatura

En la actualidad todas las neveras regulan su temperatura a través de un termostato que, ajustado a una temperatura, activa o desactiva el sistema de refrigeración para mantener constante la temperatura del interior. Esto supone que, si el ambiente de la nevera alcanza la temperatura deseada, éste se detendrá aunque los elementos del interior estén unos grados por encima de lo ideal.

Como mejora al sistema, nuestra nevera se regulará automáticamente en función de la temperatura de los envases que se encuentren próximos a su servicio. Para ello nuestro termostato será un conjunto de 4 termómetros ópticos situados en la pared interior de la nevera y dirigidos directamente a nuestros envases.

Además, tendremos en cuenta el periodo del día en el que nos encontremos para prever un aumento del consumo y satisfacer la demanda llevando al máximo la capacidad de la nevera. Como aclaración se exponen dos casos:

- Fuera del horario de trabajo y con el envase de control (el que se encuentra a punto de salir) en los 4,5°C, la nevera se mantendrá en un ciclo de conexión y desconexión.
- En horario de trabajo y con el envase de control por encima de los 4,5°C, la nevera se mantendrá operativa aun estando bajo cero el interior. Incluso una vez alcanzada la temperatura óptima del envase de control, mantendremos la nevera en régimen de trabajo ya que por encima habrá muchas más botellas en proceso de enfriamiento.

Esta botella y el periodo del día en el que se encuentre son la referencia para el funcionamiento del compresor.

5.4 Cálculos

5.4.1 Capacidad

Uno de los inconvenientes presentes en este método es la pérdida de capacidad debido a los mecanismos como paredes, railes, sujeciones, etc. Este estudio solo será satisfactorio siempre y cuando esta inversión de espacio nos permita un rendimiento mayor.

En el modelo propuesto podemos almacenar un total de **160 botellas** repartidos en cuatro columnas. Este es un dato importante pero no vital ya que la idea principal de nuestra nevera es que nos supla con un caudal constante de botellas frías. En el momento en que supere las 200 botellas frías que nos puede ofrecer una nevera convencional del mismo tamaño, ya habrá sido más productiva.

5.4.2 Carga frigorífica

La carga total de una instalación frigorífica es la cantidad de energía que debe extraerse a fin de mantener la temperatura deseada en el interior de la nevera a enfriar. Esta cifra procede del total de calor que entra en el espacio a enfriar por las tres causas siguientes:

1º. Ganancias de calor a través de las paredes.

2º. Ganancias de calor por servicio (uso de puertas, alumbrado, calor del personal, u otras fuentes de calor).

3º. Ganancias de calor por la carga de género que entra a diario.

5.4.2.1 Ganancias de calor a través de las paredes

Nuestra nevera posee un aislamiento de poliuretano expandido de 4 cm de grosor en las paredes laterales y compuerta superior. La cantidad de calor por Ganancias de calor a través de las paredes depende de tres factores:

a) Superficie total exterior de la cámara, nevera o recipiente

b) Aislamiento empleado

c) Diferencia de temperatura entre la del ambiente exterior donde se halle instalada la cámara, mueble o recipiente y la que debe obtenerse en su interior.

Como es lógico, cuanto mayor sea la superficie total exterior, mayor será la cantidad de calor que debe extraerse. Si el aislamiento es de mayor espesor, menor será el calor que escapa a través de él, y más calor deberá absorberse cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de la nevera. El primer paso para obtener las ganancias de calor por paredes consiste en determinar la superficie total de la nevera. Para obtener dicha superficie puede emplearse la siguiente fórmula [3].

$$S = 2((a \cdot b) + (b \cdot c) + (c \cdot a)) \quad (1)$$

Siendo:

a = ancho exterior = 1,01 m

b = fondo exterior = 0,55 m

c = alto exterior = 0.54 m

$$S = 2((1,01 * 0,55) + (0,55 * 0,54) + (0,54 * 1,01)) = 2,79 \text{ m}^2$$

Según la ley de Fourier enunciada como “*Cuando en un medio fluido existe un gradiente de temperatura, la energía interna, asociada a la energía de las moléculas, se transmite de un elemento a otro contiguo en la dirección del gradiente de temperatura y en sentido opuesto al de éste [4].*” Podemos determinar la pérdida de calor a través de la pared por unidad de tiempo.

$$H = kA * \frac{T_H - T_C}{L} \quad (2)$$

Donde:

- k es la conductividad térmica del aislante
- A el área
- T_H la temperatura del foco caliente
- T_c la temperatura del foco frio
- L el espesor

Siendo la conductividad del poliuretano de 0,023 J/(m·s·K)

$$H = 0,023 \frac{J}{(m \cdot s \cdot K)} \cdot 2,79 \text{ m}^2 \cdot \frac{(23 - 4,5)K}{0,04 \text{ m}} = 29,67 \text{ J/s} \quad (3)$$

Con esto tenemos que una cantidad de calor equivalente a 29,67 julios se nos “escapa” cada segundo a través de las paredes de nuestra nevera. Esto supone una energía que hay que reponer para mantener la temperatura constante.

5.4.2.2 Ganancias de calor por servicio

La cantidad de calor que entra en el refrigerador por este concepto depende del número de veces que se abran las puertas, dato que está afectado por el uso que se haga del refrigerador. En un restaurante, por ejemplo, se abrirán más veces las puertas que en una cámara de almacenamiento de quesos. A pesar de que se trata de un dato difícil de determinar de manera exacta, la experiencia ha establecido unos porcentajes de ganancias de calor por abertura de puertas, alumbrado, calor del personal, etc., Dichos porcentajes se calculan sobre la cantidad de frigorías/24 horas por ganancias de calor de paredes que previamente se habrá obtenido, y son las siguientes:

- En grandes cámaras de conservación 10%
- Para detallistas 25%
- Para restaurantes, bares y pastelerías 40%

En el caso que nos ocupa, la salida de aire frío se realizará cada vez que extraigamos una botella. Para calcular esta ganancia podemos valorar el volumen de aire que debe ser reemplazado y que se introducirá a temperatura ambiente por minuto.

La compuerta por donde debe salir la botella tiene unas medidas de 240 por 65 mm que con una profundidad de 65 mm nos da un volumen de aire de $0,001014 \text{ m}^3$.

Con una densidad de 1,2 kg por metro cúbico de aire y un calor específico de 0,24 kcal/kg °C tenemos:

$$Q = m * c * \nabla T \quad (4)$$

En la que sustituyendo valores:

$$Q = 0,001014 \text{ m}^3 * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1.004,16 \frac{\text{J}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (22^\circ\text{C} - 4,5^\circ\text{C}) = 21,4 \text{ J} \quad (5)$$

Por lo que cada vez que se extraiga una botella de la nevera, se deberá reponer el aire frío que sale con él y que equivale a 21,4 Julios de energía.

5.4.2.3 Ganancias de calor por la carga de género

Para obtener dicho valor, cuando se trata de la conservación de productos a temperaturas positivas, deben conocerse los siguientes factores:

- a. Cantidad en kilogramos de género que entra diariamente en la cámara, mueble o recipiente.
- b. Diferencia de temperatura del género a su entrada y la que debe obtenerse en el interior.
- c. Calor específico del producto a enfriar.

La entrada diaria de género es un dato de mucha importancia y debe precisarse de la manera más aproximada posible.

Como el vidrio del envase también forma parte en la ecuación, vamos a diferenciar elementos.

- Masa del vidrio: 230 gr
- Masa de la cerveza: 331,65 gr
- Conductividad térmica k del vidrio: 0,6
- Capacidad calorífica del vidrio: 0,186 cal/g °C
- Capacidad calorífica del agua: 1 cal/g °C

Tomamos la capacidad calorífica del agua como referencia ya que la cerveza está compuesta por ella en un 94%.

Para llevar una botella desde una temperatura ambiente media de 22°C a una de consumo de 4,5°C sustituimos en la ecuación (3):

$$Q_{\text{vidrio}} = 230 \text{ g} * \frac{0,186 \text{ cal}}{\text{g} * ^\circ\text{C}} * (22 - 4,5)^\circ\text{C} = 748,65 \text{ cal} \quad (6)$$

$$Q_{\text{cerveza}} = 331,65 * \frac{1 \text{ cal}}{\text{g} * ^\circ\text{C}} * (22 - 4,5)^\circ\text{C} = 5.804 \text{ cal} \quad (7)$$

$$Q_{Total} = Q_{vidrio} + Q_{cerveza} = 748,65 \text{ cal} + 5.804 \text{ cal} = 6.552,65 \text{ cal} = 27.416,29 \text{ J} \quad (8)$$

Tendríamos que extraer 27.416,29 julios por cada botella para reducir su temperatura de 22 a 4,5 grados centígrados.

El cálculo para la carga de este sistema va a ser algo más complejo debido a diferentes factores que debemos tener en cuenta como que la entrada y salida de género es algo irregular en el tiempo, quiero decir, no se van a introducir un determinado número de botellas en un determinado instante, si no que dependerá del consumo.

En vez de realizar un análisis estadístico de la cantidad de cerveza que se consume de media en un bar/restaurante en función de su aforo, vamos a presentar un intervalo de consumo en función del tiempo.

Consumo (Botella/min)	Tiempo en el interior (min)	Calor añadido (J/min)
1	160	29.217,89
2	80	58.435,78
3	53	87.653,67
4	40	116.871,56
5	32	146.089,45
6	27	175.307,34
7	23	204.525,23
8	20	233.743,12
9	18	262.961,01
10	16	292.178,90

Tabla 1. Carga por género

En la tabla anterior se presenta una relación entre las botellas que se extraen de la nevera y por consiguiente los que se introducen a temperatura ambiente, el tiempo que pasará una botella recorriendo el circuito y el calor que se introduce en la nevera cada minuto a causa de las pérdidas por servicio, por género y a través de las paredes.

5.4.3 Máquina frigorífica

Una máquina frigorífica se define como una máquina de evolución cíclica que transfiere energía térmica desde una zona de baja temperatura hasta otra de alta temperatura, gracias al trabajo aportado desde el exterior, generalmente por un motor eléctrico.

La potencia de nuestro equipo limitará la capacidad que éste tiene de absorber calor de un recinto.

Se define frigoría como “el número de kilocalorías del Sistema Técnico que es capaz de absorber en una hora”. Así, una frigoría (fg) equivale a la absorción de 1.000 cal en una hora.

$$fg = -1.000 \frac{cal}{h} = -1 \frac{kcal}{h} = -4.184 \frac{J}{h} \quad (8)$$

Una frigoría es equivalente a 1,163 W (vatios), por lo tanto 1000 vatios (1 kW) equivale aproximadamente a 860 frigorías.

Las neveras actuales se rigen por un ciclo de compresión de vapor, este fluido normalmente es un refrigerante, como el R-134A, cuyo punto de ebullición se sitúa en los -26,3 grados Celsius.

En este apartado vamos a dimensionar la potencia que debe tener nuestro compresor para mantener la temperatura de la nevera constante. Para ello vamos a recuperar la tabla anterior en la que se muestra la energía introducida por las botellas en función de su consumo y a la que le añadiremos una columna con este nuevo dato.

La potencia se calcula de la siguiente forma:

- Primero calculamos la eficiencia de nuestra máquina frigorífica que se define como la relación entre el calor extraído del foco frío y el trabajo utilizado [10].

$$\varepsilon = \frac{Q_f}{W} \quad (9)$$

En una situación idónea, la eficiencia se puede obtener con una relación entre las temperaturas del foco frío y caliente. Siendo esta eficiencia:

$$\begin{aligned} T_f &= 273 + 4,5 = 277,5 \text{ K} \\ T_c &= 273 + 22 = 295 \text{ K} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_f}{W} = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f} = \frac{T_f}{T_c - T_f} = \frac{277,5 \text{ K}}{295 \text{ K} - 277,5 \text{ K}} = 15,86 \quad (11)$$

Esto sería en el caso ideal de una máquina reversible en un ciclo de Carnot.

Pero para ser más veraz en los cálculos, tomaremos los datos de la potencia que generalmente usan este tipo de neveras y que se encuentra entre los 227 y 245 W, siendo la nuestra de 230 W.

Recuperando datos de la ilustración 11, tenemos que nuestra máquina frigorífica ha sido capaz de disminuir la temperatura de una botella de vidrio y 50 litros de agua en 15 grados en un periodo de tiempo de 2 horas. Esto traducido en energía absorbida supone:

$$\begin{aligned} Q_T &= Q_{\text{vidrio}} + Q_{\text{cerveza}} + Q_{\text{agua}} \\ &= \Delta T \cdot (m_{\text{vidrio}} \cdot c_{\text{vidrio}} + m_{\text{cerveza+agua}} \cdot c_{\text{cerveza/agua}}) \end{aligned} \quad (12)$$

La masa de la cerveza y el agua se incluyen en la misma variable ya que su composición es casi idéntica.

$$15 \cdot (230 \cdot 0,186 + 50 \cdot 331,65 \cdot 1) = 755.616,45 \text{ cal} = 3.161.499,2 \text{ J} \quad (13)$$

La potencia de nuestra nevera es de 230 W, esto quiere decir que consume 230 julios por cada segundo que se encuentre funcionando. Como para

enfriar la carga anterior ha requerido de 2 horas, esto se traduce en un consumo de 1.656.000 J.

Sustituyendo en la ecuación 9:

$$\varepsilon = \frac{Q_f}{W} = \frac{3.793.799,1}{1.656.000} = 2,291 \quad (14)$$

Q_f representa el calor que se desea extraer del foco frío en J por minuto. En el caso de extraer una botella por minuto, el calor a absorber será de 29.217,89 J/min.

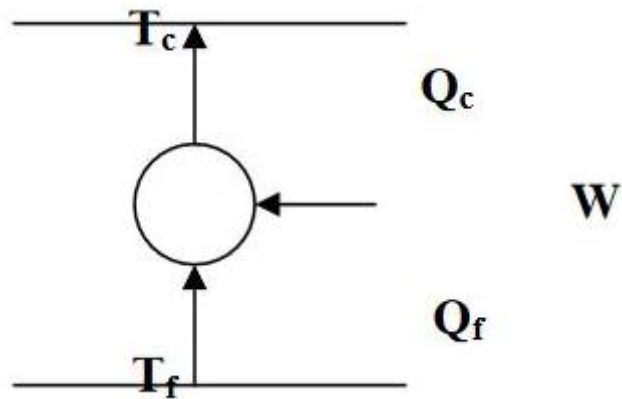


Ilustración 19. Esquema máquina térmica.

Despejando y sustituyendo:

$$\varepsilon_{maq.} = \frac{Q_f}{W} \rightarrow W = \frac{29.217,89 \text{ J/min}}{2,291} = 12.753,33 \text{ J/min} \quad (14)$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{12.753,33 \text{ J}}{\text{min}} = \frac{12.753,33 \text{ J}}{60 \text{ s}} = 212,56 \text{ W} \quad (15)$$

Llevando los valores de las potencias a la tabla anterior, nos queda:

Consumo (Botella/min)	Tiempo en el interior (min)	Calor añadido (J/min)	Potencia (W)
1	160	29.217,89	212,56
2	80	58.435,78	425,11
3	53	87.653,67	637,67
4	40	116.871,56	850,22
5	32	146.089,45	1.062,78
6	27	175.307,34	1.275,33
7	23	204.525,23	1.487,89
8	20	233.743,12	1.700,44
9	18	262.961,01	1.913,00
10	16	292.178,90	2.125,56

Tabla 2. Potencia en función del calor añadido

Con esto lo que se está calculando es la potencia necesaria que debe tener nuestra nevera para hacer frente al calor introducido por las causas ya nombradas anteriormente y mantener así una temperatura constante en el interior. Ahora solo quedaría calcular si nuestra botella es capaz de desprenderse de toda su energía durante su recorrido por la nevera.

5.4.4 Flujo de calor

El calor es una forma de energía que se transfiere entre dos cuerpos cuando sus temperaturas son diferentes. La transmisión de calor se puede realizar por tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación. En un mecanismo de climatización dentro de paredes homogéneas se puede despreciar el efecto de la radiación frente a los otros dos.

La transmisión de calor por conducción se produce por la migración de electrones libres en metales y/o propagación de vibraciones mecánicas de la red cristalina dentro de los límites de un material o a través de la superficie de contacto entre dos cuerpos y sin que se produzca transporte de materia.

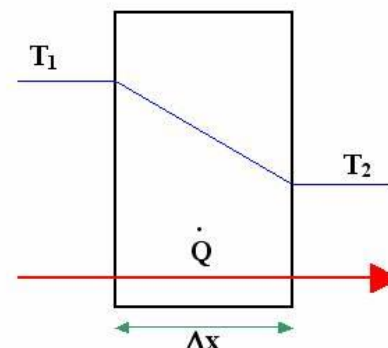


Ilustración 20. Esquema transferencia calor

La velocidad con la que podemos enfriar nuestra botella depende directamente del gradiente de temperatura que es la diferencia

de temperatura entre el exterior e interior del envase y de la conductividad térmica del vidrio.

Calcularemos la cantidad de energía teórica que pasa a través de un conductor como el vidrio por unidad de tiempo. En nuestro caso la pared del envase es vidrio de 3 mm de grosor y $0,04 \text{ m}^2$ de área.

Aplicando la ley de Fourier:

$$H = kA * \frac{T_H - T_C}{L} = 0.6 \left(\frac{W}{m * K} \right) * (0.04 \text{ m}^2) * \frac{295K - 275K}{0.003 \text{ m}} = 160 \text{ W} = 160 \frac{J}{s} \quad (16)$$

La transmisión de calor será mayor cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del envase. Por ello la velocidad con la que pierde calor disminuirá conforme se acerque a la temperatura del ambiente en el que se encuentra. En la siguiente tabla vemos la relación entre la diferencia de temperatura y la energía que se transmite cada segundo.

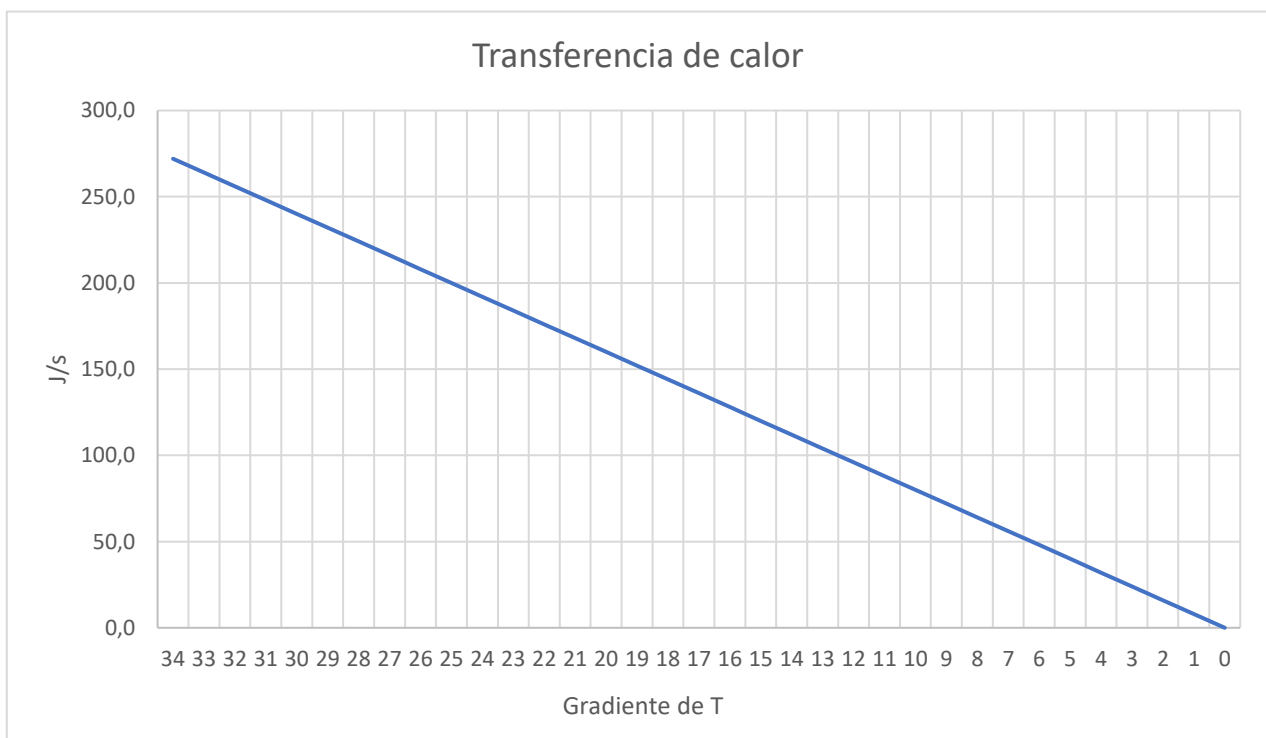


Ilustración 21. Velocidad en la transferencia de calor.

Para aumentar la velocidad con la que se transfiere calor y por ende, disminuir el tiempo de enfriamiento, hay diferentes opciones, ya sea aumentando

la superficie de contacto, mejorando el coeficiente de transmisión de calor o aumentando el diferencial de temperatura entre nuestro envase y la nevera.

Vamos a comprobar si realmente la velocidad con la que se traspasa calor es la expuesta por Fourier analizando tres casos prácticos.

1. Remitiéndonos a la ilustración 10, observamos que entre los segundos 360 y 540 el fluido de la botella pasa de 14,384°C a 13,998°C. Calculando la energía necesaria que hay que extraer para disminuir en 0,386 grados centígrados su temperatura tenemos que:

$$Q_T = Q_{vidrio} + Q_{cerveza} = \Delta T(m_{vidrio} * c_{vidrio} + m_{cerveza} * c_{cerveza}) =$$

$$= 0.386 * (230 * 0,186 + 331,65 * 1) = 144,52 \text{ cal} = 604,67 \text{ J} \quad (17)$$

$$\frac{604,67 \text{ J}}{540\text{s} - 360\text{s}} = 3,35 \text{ J/s}$$

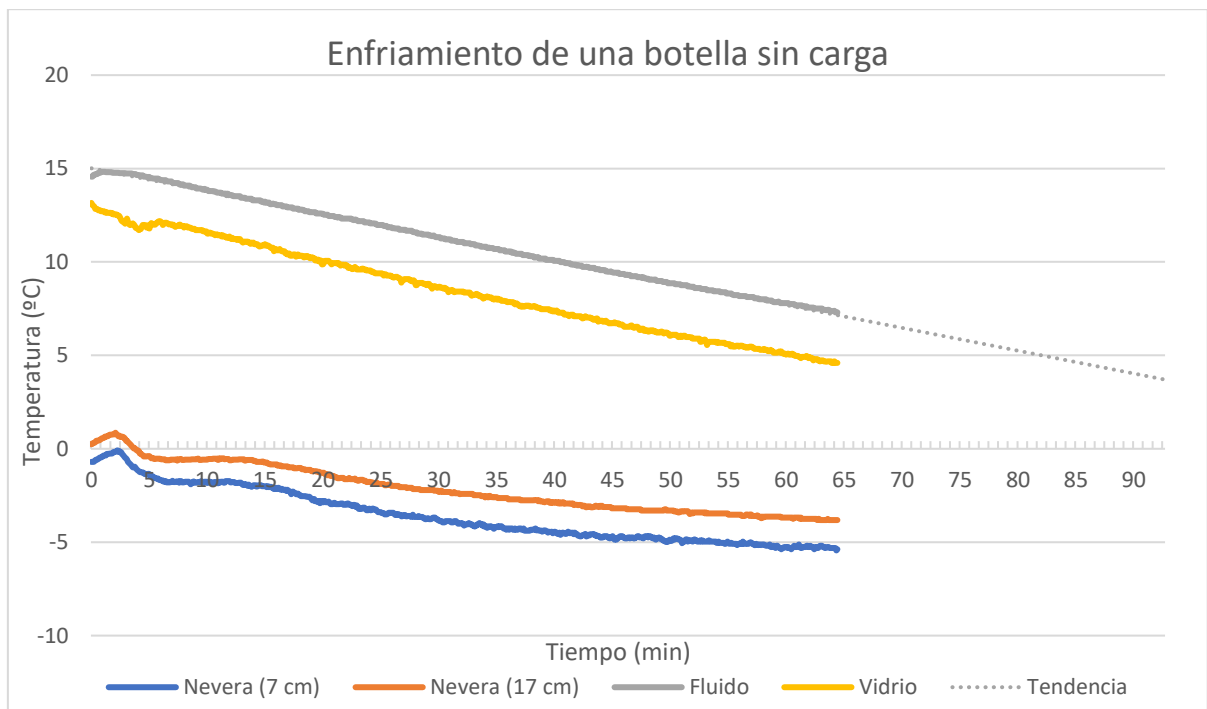


Ilustración 22. Enfriamiento de una botella sin carga

Teóricamente el flujo de calor por segundo entre la nevera a -1,7°C y la botella a 14°C debería ser de 213,3 J/s, mientras que nuestro experimento nos revela un flujo de 3,35 J/s.

2. En otra medición realizada en el congelador de casa recogí los datos mostrados en la tabla siguiente:

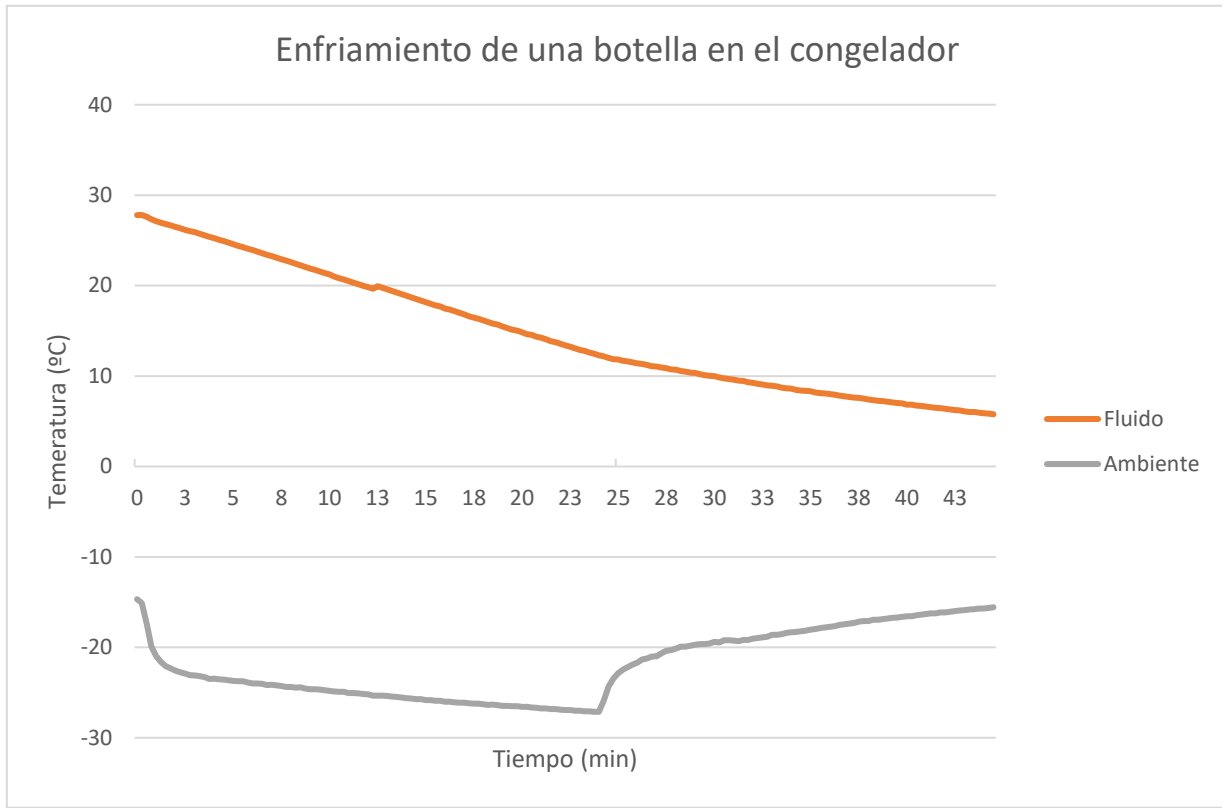


Ilustración 23. Enfriamiento congelador

Tomaremos un intervalo en el que la temperatura del congelador se mantenga constante y calcularemos el flujo con el que se ha transferido el calor de la botella al exterior.

Entre los segundos 180 y 270 el congelador se mantiene a una temperatura media de $-23,3^{\circ}\text{C}$ mientras que la botella pasa de $25,911$ a $24,917$ grados centígrados.

Repitiendo el proceso anterior tenemos que:

$$Q_T = 0,994 * (230 * 0,186 + 331,65 * 1) = 374,43 \text{ cal} = 1.566,615 \text{ J} \quad (18)$$

$$\frac{1.566,614 \text{ J}}{270 \text{ s} - 180 \text{ s}} = 17,4 \text{ J/s}$$

Siendo el diferencial de temperatura de 48°C la transmisión de calor debería ser de 640 J/s.

Aún así, el valor de 17,4 J/s no se puede tomar como ejemplo ya que la botella se encontraba en contacto directo con otros elementos del congelador haciendo que la transferencia de calor tuviera un factor de conducción entre sólidos con una mayor capacidad calorífica que el aire.

3. Con la intención de corroborar que el contacto entre el envase y otros elementos hace que se transfiera energía más rápido, hemos realizado otra toma de datos.

Esta vez en la nevera, a una temperatura casi constante de 3°C y con el único contacto del culo de la botella sobre la balda de plástico.

Siendo estos los resultados:

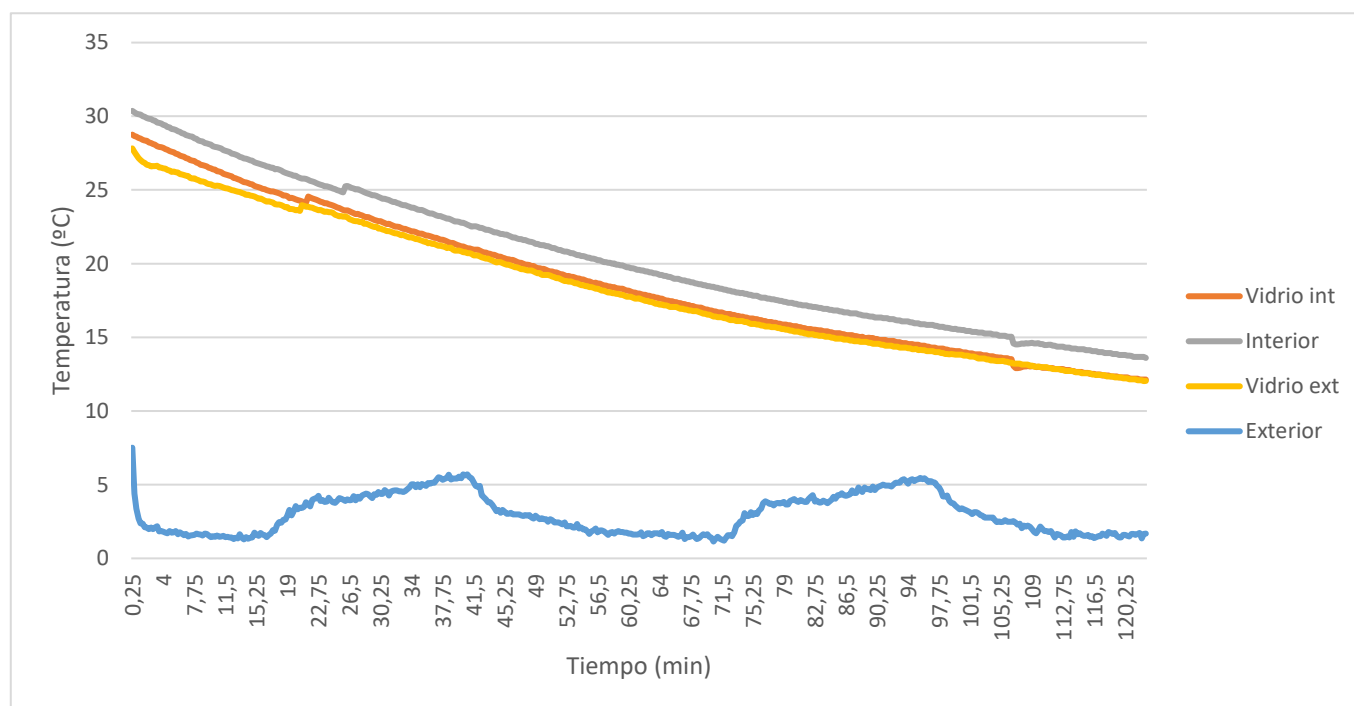


Ilustración 24. Enfriamiento en nevera sin contacto en las paredes

Con 4 sondas colocadas en el interior de la botella, cara interior de la pared de vidrio, cara exterior de la pared y a escasos centímetros de la botella hemos completado una gráfica en la que después de 2 horas solo hemos conseguido disminuir la temperatura en poco más de 15°C. Viendo la curva y su

tendencia nos podemos hacer a la idea de que alcanzar la temperatura óptima será algo inimaginable.

Entre el minuto 9 y el 13, la temperatura de la nevera se encuentra estable en un valor de 1,6°C. Mientras tanto, el interior de la botella ha pasado de 28,189 a 27,245°C lo que supone una disminución de 0,994 grados.

$$Q_T = 0,994 * (230 * 0,186 + 331,65 * 1) = 374,43 \text{ cal} = 1.566,615 \text{ J} \quad (19)$$

$$\frac{1.566,614 \text{ J}}{(13 \text{ min} - 9 \text{ min}) * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 6,52 \text{ J/s}$$

5.4.5 Tiempo de enfriamiento

5.4.5.1 Ley de enfriamiento de Newton

Con las leyes de transferencia de calor podemos calcular las calorías necesarias para llevar un cuerpo de una temperatura “A” a una “B”. El problema es que el tiempo invertido en su enfriamiento no entra en juego en la ecuación, lo que es primordial para nosotros.

En cambio, con la ley de enfriamiento de Newton enunciada como:

“Cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es demasiado grande, el calor transferido en la unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo por conducción, convección y radiación es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio externo. [5]”

Podemos determinar el valor que tomará la temperatura de nuestro cuerpo respecto al tiempo, aunque para ello necesitamos unos valores de frontera.

Nos apoyaremos en datos prácticos de una medición anterior (Ilustración 10) para desarrollar esta ecuación:

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_m) \quad (20)$$

Donde:

- T = Temperatura de un cuerpo
- t = Tiempo
- Tm = Temperatura ambiente

Resolviendo por el método de variables separables:

$$\frac{dT}{T - T_m} = k dt \quad (21)$$

Integrando en ambos lados:

$$\int \frac{dT}{T - T_m} = k \int dt \quad (22)$$

Obtenemos:

$$\ln(T - T_m) = kt + c_1 \quad (23)$$

Simplificando:

$$T - T_m = e^{kt+c_1} \quad (24)$$

$$T - T_m = e^{kt} * e^{c_1}; e^c = C \quad (25)$$

$$T = T_m + Ce^{kt}; \quad k < 0$$

Ahora supongamos que un cuerpo (nuestra botella) a 14,38°C es depositado en un lugar donde la temperatura se mantiene a -1.7°C. Después de 3 min la botella se encuentra a 13,998°C.

Si $T(t)$ es la temperatura del cuerpo en $^{\circ}\text{C}$ después de t minutos, entonces la ecuación diferencial que modela a $T(t)$ es:

$$T(t) = Ce^{kt} - 1,7 \quad (26)$$

Mediante la condición $T(0)$ determinamos C

$$T(0) = 14,38 \rightarrow T(0) = Ce^{k \cdot 0} - 1,7 = 14,38 \leftrightarrow C - 1,7 = 14,38$$

$$C = 16,08$$

Usando la condición $T(3)$ determinamos el valor de k

$$\begin{aligned} T(3) = 13,998 &\rightarrow 16,08e^{k \cdot 3} - 1,7 = 13,998 \\ e^{3k} &= 0,9762 \\ \ln e^{3k} = 3k &= \ln(0,9762) \\ k &= -0,0035 \end{aligned} \quad (28)$$

Llegando a la ecuación

$$T(t) = 16,08e^{-0,0035t} - 1,7 \quad (29)$$

¿Cuánto tiempo pasará para que el cuerpo esté a $4,5^{\circ}\text{C}$?

Sustituyendo en (29)

$$\begin{aligned}
 T(t) &= 16,08e^{-0.0035t} - 1,7 = 4,5 \\
 e^{-0.0035t} &= \frac{4,5 + 1,7}{16,08} = 0,3855 \\
 -0,0035t &= \text{Ln}(0,3855) \\
 t &= \frac{\text{Ln}(0,3855)}{-0,0035} \approx 272,34 \text{ min}
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

La respuesta es 272 minutos lo que equivale a 4 horas y media.

Esto es plausible ya que la temperatura del medio se encuentra más de 5 grados por debajo de nuestro objetivo de 4,5°C. Como vemos, acercarse al equilibrio térmico requiere de un tiempo casi infinito ya que la gráfica descrita es exponencial con asíntota en la temperatura ambiente.

5.4.5.2 En base a los experimentos realizados

Las mediciones anteriores nos revelan que en una nevera en la que la temperatura gire en torno a los 2°C el flujo de calor entre al aire frío y el fluido de la botella se va a mover entorno a valores de 6 J/s al inicio y de 2 J/s al final ya que al principio la temperatura desciende con mayor velocidad, pero a medida que se acerca a la temperatura ambiente va a ser más complicado que alcancemos los deseados 4,5°C.

Esto quiere decir que para extraer los 29.217,89 J necesarios para bajar la temperatura de nuestra cerveza en 17,5 grados nos va a tomar, a grosso modo, tomando una media de velocidad de flujo de 4 J/s:

$$\frac{29.217,89 \text{ J}}{4 \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 7.304,47 \text{ s}
 \tag{31}$$

O lo que es igual, 122 minutos.

6. Refrigeración por agua

El responsable de que la velocidad con la que nuestra botella expulse calor sea tan baja es el aire. El aire es un material aislante de poca capacidad calorífica. Al contrario que el aire, el agua es un gran conductor, cuya capacidad calorífica se sitúa en 1 kcal/ kg °C mientras que la capacidad del aire es de 0,24 kcal/ kg °C.

Esto quiere decir que será capaz de absorber una mayor cantidad de energía con la misma masa. Tanto es así, que en un experimento realizado en un recipiente de goma con agua y hielo a una temperatura casi constante de 7°C hemos obtenido los siguientes resultados:

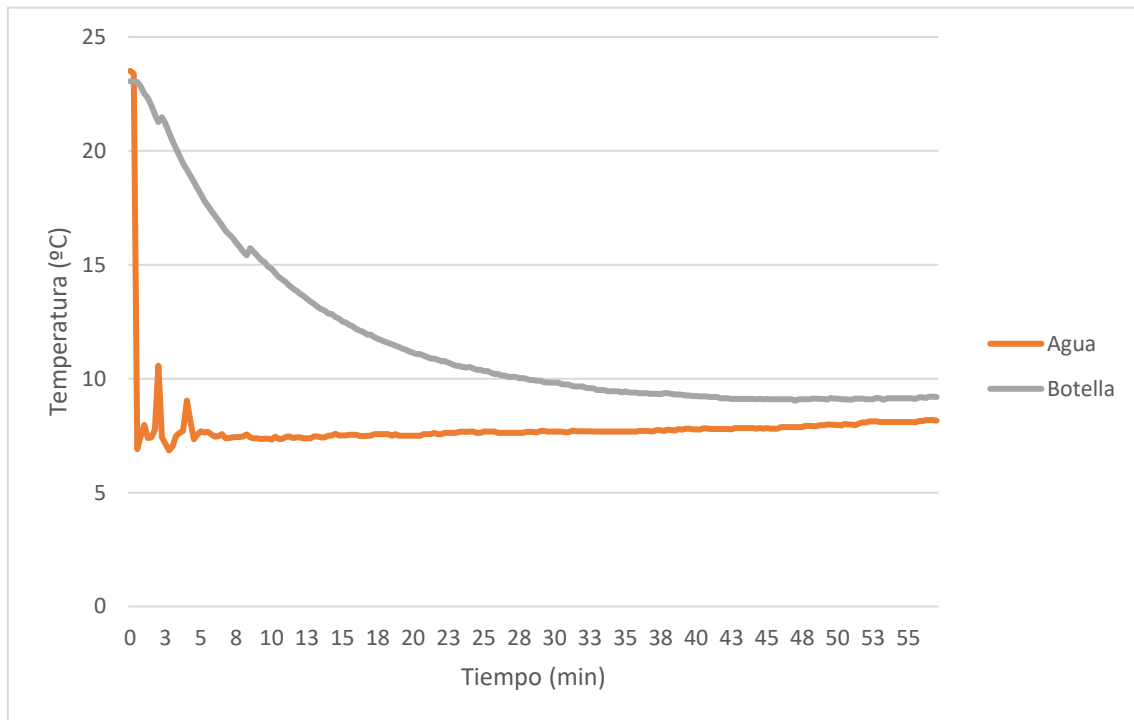


Ilustración 25. Enfriamiento en agua

Aquí podemos ver claramente como la curva es mucha más pronunciada que en experimentos anteriores. En cuestión de 30 minutos, el agua ha sido capaz de retirar energía suficiente de la botella como para disminuir su temperatura en 13°C.

Calculando el flujo de calor entre los minutos 5 y 8 tenemos que:

$$\begin{aligned}
 Q_T &= (18,904 - 16,182) * (230 * 0,186 + 331,65 * 1) = 1.019,19846 \text{ cal} \\
 &= 4.264,326 \text{ J}
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

$$\frac{4.264,326J}{(8min - 5min) * 60 \frac{s}{min}} = 23,69 J/s$$

Este es el valor máximo para el flujo que hemos conseguido experimentalmente y que será mayor cuanto más amplia sea la diferencia de temperatura entre el medio y la botella.

En el caso de desarrollar un sistema de guías en este medio, el recorrido que seguiría la botella sería similar, solo cambiarían las compuertas inferiores para evitar fugas de agua haciendo que la botella entrara y saliera por la zona superior.

El volumen de nuestra nevera es de $0,1347 m^3$, lo que equivale a 134,7 litros de agua. A esto hay que restarle el volumen de las 128 botellas que se encontrarían sumergidas en el agua y que equivale a unos 42,24 litros ya que:

$$0,33 \frac{L}{botella} * 128 botellas = 42,24 L \quad (33)$$

Resultando en 92,46 litros de agua que requerirán una cantidad alta de energía una única vez para enfriarla, el resto solo será mantenerla a una temperatura estable.

En un estado de trabajo en el que nuestra nevera se encontrase con la carga y el medio acuoso a unos $4,5^{\circ}C$, se requeriría de la misma potencia del sistema frigorífico para mantener estable la temperatura ya que el calor añadido sería idéntico al de la tabla anterior.

Como ventaja encontramos que, consumiendo la misma energía, disminuimos los tiempos de enfriado además de que el impacto de introducir una botella a temperatura ambiente sería absorbido por la carga al completo.

Como desventaja se podría nombrar el deterioro de las etiquetas al encontrarse sumergidas tanto tiempo.

7. Simulación de caso real

Imaginemos que ya hemos desarrollado el proyecto y es el primer día de nuestra nevera en un restaurante. La situación inicial son 160 botellas a una temperatura de 4,5°C. En este momento se comienza a extraer e introducir botellas.

Sacamos la primera botella, por lo que ahora tenemos 159 envases a 4,5°C y uno a 22°C. ¿Qué tardará esta única botella en enfriarse?

Para que alcance los 4,5°C se le deben extraer 27.437,69 J de energía. Esta energía será absorbida por el aire que la nevera ha enfriado únicamente ya que el contacto con el resto de las botellas es nulo, impidiendo así una transferencia de calor conductiva más rápida.

Como este enfriamiento depende únicamente de la nevera y sabiendo que como mucho puede extraer 4 Julios por segundo tendríamos que la botella requiere de, aproximadamente 122 minutos. Este es el tiempo mínimo que nuestra botella debe pasar en el circuito para poder enfriarse. Recuperando datos de la tabla:

Consumo (Botella/min)	Tiempo en el interior (min)	Calor añadido (J/min)	Potencia (W)
1	160	29.217,89	212,56
2	80	58.435,78	425,11
3	53	87.653,67	637,67
4	40	116.871,56	850,22
5	32	146.089,45	1.062,78

Tabla 3. Tiempo en el circuito

Vemos que la única opción en la que nuestra botella pueda pasar más de 122 minutos en el interior de la nevera es con la extracción de una unidad por minuto. Así, para igualar la capacidad del sistema por apilamiento, tendríamos que servir botellas por un periodo mínimo de 3 horas y 20 minutos.

8. Conclusiones

Con la tabla presente:

Consumo (Botellas/min)	Tiempo en el interior (min)	Calor añadido (J/min)	Potencia (W)
1	160	29217,89	212,56
2	80	58435,78	425,11
3	53	87653,67	637,67
4	40	116871,56	850,22
5	32	146089,45	1062,78

Tabla 4. Calor añadido

Podemos determinar que:

- Como mucho tendremos oportunidad de extraer una botella por minuto si queremos mantener un caudal constante a buena temperatura, ya que en menos de 120 minutos nuestra botella no podría alcanzar el rango de los 6°C.
- La potencia de nuestra nevera no es el factor más importante a la hora de enfriar un producto, sino el medio en el que se encuentra y el contacto con otros elementos.
- En el caso de desarrollar la alternativa de refrigeración por agua, se podría obtener un caudal de hasta 5 botellas por minuto siempre y cuando el sistema frigorífico dimensionara la potencia adecuada.

9. Bibliografía

[1] Historia de la refrigeración

<https://www.josebernad.com/historia-de-la-refrigeracion-de-la-prehistoria-a-la-actualidad/>

[2] Tipos de cerveza

<http://www.cervemur.es/tipos-de-cerveza/>

[3] Cargas de calor

http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700502/moodle/file.php/76/2_Curso/0039._Configuracion_de_instalaciones_de_frio_y_climatizacion/Capitulo_III/Calculo_de_instalaciones_frigorificas_C.pdf

[4] Ley de Fourier

<https://www2.uned.es/ing-fluidos/IntroMF/node17.html>

[5] Ley de enfriamiento de Newton

<https://es.khanacademy.org/math/differential-equations/first-order-differential-equations/exponential-models-diff-eq/v/newtons-law-of-cooling>

[6] Ilustración medidas botella

http://www.vidrala.com/default/documentos/catalogo/2017/08/182_20170808_143525--1530-101.pdf

[7] Ilustración tipos de botella

<http://www.apiglass.net/cervezas/botellas/>

[8] Ilustración temperatura de servicio

<https://cervezone.com/la-temperatura-ideal-para-la-cerveza/>

[9] Ilustración nevera estándar

<https://www.milanuncios.com/anuncios/botellero-cruzcampo.htm>

[10] Rendimientos y máquinas frigoríficas

[https://tecnopacheco.webcindario.com/archivos/TIN2/Ejercicios%20resueltos%20de%20maquinas%20frigorificas%20\(lorenzo\).pdf](https://tecnopacheco.webcindario.com/archivos/TIN2/Ejercicios%20resueltos%20de%20maquinas%20frigorificas%20(lorenzo).pdf)