



FoDAMI



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Ahorro de energía en túnel de frío de refrescamiento directo de uva

F. Alenda, M. Díaz, M. Velasco, J. Vuanello, E. Rojos,

Departamento de Electromecánica - Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador Gral. San Martín 1109 oeste San Juan – Argentina
Tel. 0264-4211700 Int. 321 / 317 - +54-2644200289 - E-mail: erojos@unsj.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo propone un nuevo sistema de refrescamiento de uvas en el cual se mejora el proceso de transferencia de calor para lo cual ésta se enfría a través del contacto directo con el aire de enfriamiento.

A través del estudio teórico se muestra la forma en que debe circular el aire sobre la uva para que evite la deshidratación y aumente la transferencia de calor. Se realizan ensayos experimentales con los cuales se comprueba el desarrollo teórico.

Los resultados que se obtuvieron a través de la experiencia es que el producto final es de mejor calidad del que se obtiene con el sistema tradicional y se reducen los tiempos utilizados en el proceso.

Como conclusión se puede mencionar el importante ahorro energético que se consigue con lo cual el nuevo proceso propuesto hace un uso racional de la energía.

Palabras Claves: Ahorro de energía, refrescamiento directo, nuevo proceso.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el sistema utilizado para bajar la temperatura de la uva a valores de cámara de conservación es el túnel californiano el cual utiliza como unidad de enfriamiento el pallet, en el cual la uva está embalada con materiales que tienen bajos coeficientes de transferencia de calor [1]. La principal desventaja de este sistema es el tiempo que utiliza para llevar el producto desde la temperatura ambiente a la temperatura de cámara de conservación. Esta situación trae como consecuencia un excesivo consumo energético y falta de calidad en el producto final.

Para mejorar el proceso de transferencia de calor se propone enfriar la uva a través del contacto directo de ésta con el aire de enfriamiento, el cual debe tener una temperatura mínima de trabajo y una velocidad máxima de incidencia sobre la uva. La temperatura mínima está relacionada con evitar el congelamiento y la velocidad máxima con evitar la deshidratación del producto [2].

El estudio teórico permite encontrar la forma de hacer circular el aire de refrescamiento sobre la uva para encontrar valores máximos de transferencia de calor. A través de la experimentación se confirmó la validez de los estudios teóricos, como así también se obtuvo una mejora en la calidad final del producto. Una de las ventajas principales de este nuevo proceso de refrescamiento está relacionada con el ahorro de energía, por lo cual se puede decir que a través del nuevo método propuesto se hace un uso racional de la energía.

2. Estudio teórico

2.1. Capa límite. Desprendimiento y transición

Cuando un fluido fluye sobre una superficie, debido a la fricción, la capa más cercana a la superficie se detiene completamente. Encima de esta capa se forman otras, cada una de las cuales tiene menos fricción que la anterior y por tanto mayor velocidad. Así hasta que a partir de una capa concreta no hay fricción y las capas tienen la velocidad libre del fluido, ver Figura 1. Al conjunto de capas que van desde la que tiene velocidad cero hasta la que tiene velocidad libre se le llama capa límite, y a la distancia entre la primera y la última, espesor de la capa límite.

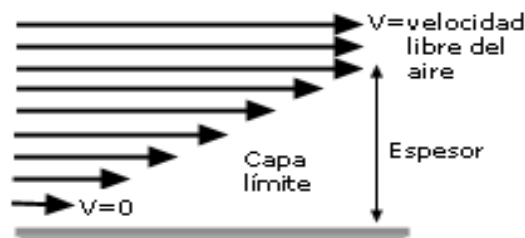


Figura 1: perfil de velocidades en la capa límite.

Cuando el aire que viene del infinito incide en una placa plana se forma sobre ésta la capa límite y el espesor de la misma aumenta progresivamente aguas abajo de la corriente, existiendo una zona inicial de flujo laminar, que se transforma progresivamente en turbulento a medida que se avanza en la longitud de la placa a la vez que crece el espesor, esto se puede ver en la Figura 2.

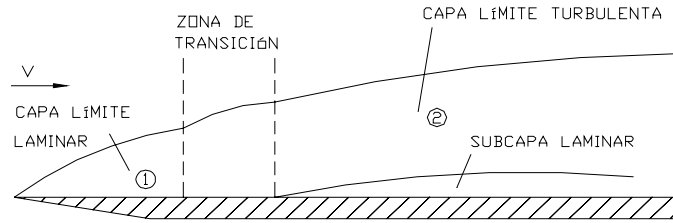


Figura 2: Diferentes desarrollos de la capa límite, pasa de capa límite laminar a capa límite turbulenta.

Se define línea de separación a aquella que separa el movimiento del fluido en la capa límite del que gira en los remolinos insertos en ésta. En este fenómeno interviene de manera fundamental la variación de presiones a lo largo del contorno del cuerpo. En el interior de la capa límite las presiones vienen impuestas por las del fluido exterior, coincidiendo con ella cuando el contorno es plano ó de moderada curvatura.

En las placas planas también se puede producir el retroceso, ocasionando la separación de la corriente, pero antes de producirse tal separación la capa límite laminar se transforma en turbulenta. En esta situación la capa límite se adhiere a la superficie en una mayor longitud, luego de lo cual se produce la separación. Lo mencionado en el párrafo anterior explica el fenómeno de transición.

3. Desarrollo.

3.1. Formación de torbellinos permanentes en la uva.

Como la superficie de intercambio de calor es el racimo de uva, y ésta es muy irregular, además la velocidad de aire que intercambia calor es baja, se formará sobre esta área una capa laminar turbulenta [3]. Pero la irregularidad produce zonas donde esta capa se despegue, separa la corriente de aire de la uva y se forman torbellinos permanentes que dificultan la transferencia de calor, motivo por el cual se necesita eliminar estos torbellinos, ver Figura 3.

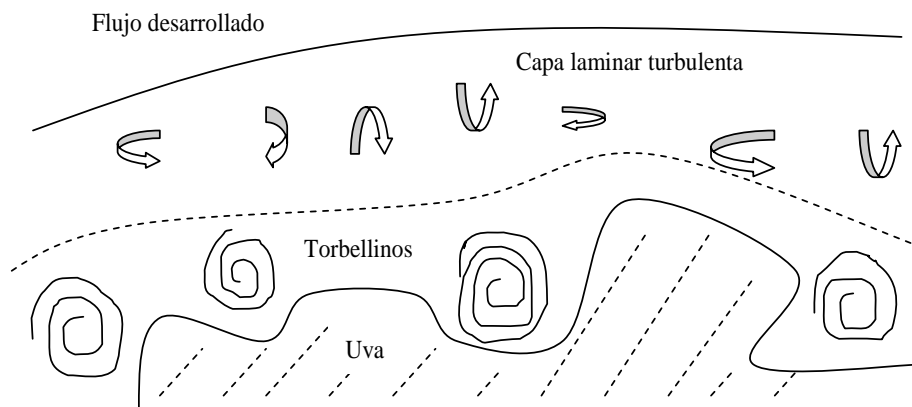


Figura 3: Se puede ver los torbellinos que limitan la transferencia de calor. Considerar que el esquema corresponde a un plano transversal del racimo de uva.

A las partículas que forman el torbellino permanente se le debe entregar energía para que puedan vencer las presiones que los forman, esto se puede lograr variando el módulo de la velocidad del flujo de aire en forma alternativa dentro de determinados límites e independientemente variar la dirección y/o sentido, con lo cual se aumenta la cantidad de movimiento intercambiado entre las partículas, logrando que los torbellinos tiendan a disminuir ó desaparecer, de forma tal que la en capa límite éstos no aparezcan.

Con la desaparición de los torbellinos el coeficiente de transferencia de calor por convección aumentaría, mejorando la cantidad de calor intercambiada por convección.

3.2. Mejora en la transferencia de calor.

En trabajos anteriores se ha demostrado que la uva se puede enfriar en forma directa sin que pierda las cualidades organolépticas. Para ello se debe tener en cuenta que la velocidad del aire sobre la uva no debe superar por ningún motivo los 250 m/min ya que se produciría deshidratación, lo cual haría perder la calidad final del producto. Como se trata de lograr la máxima transferencia de calor, se trabaja cerca de ésta velocidad límite, por lo tanto la única forma de aumentar la transferencia de calor es eliminando los torbellinos permanentes.

La consecuencia de haber logrado enfriar la uva en forma directa (sin embalaje) y a su vez aumentar la transferencia de calor en este proceso, se ve directamente reflejada en un importante ahorro energético, en relación con el sistema convencional.

Si bien la cantidad de aire utilizada a una determinada temperatura para sacar el calor de una determinada masa de uva es la misma para ambos sistemas, ver Ecuación (1), el ahorro de energía se ve manifestado a través del menor tiempo que se utiliza para producir el refrescamiento deseado.

$$\Delta Q_{\text{aire}} = m_{\text{aire}} * c_{\text{paire}} * \Delta t_{\text{aire}} = \Delta Q_{\text{uva}} = m_{\text{uva}} * c_{\text{puva}} * \Delta t_{\text{uva}} \quad (1)$$

La mejora en la transferencia de calor se demuestra cuando el coeficiente global de transferencia U_p para el sistema propuesto es mayor que para el sistema convencional U_c . De la Ecuación (2) se puede determinar éste coeficiente.

$$\Delta Q = U * A * \Delta t \quad (2)$$

4. Experimentación

4.1. Determinación de los valores de los coeficientes de transferencia de calor.

Los ensayos experimentales se realizaron en un túnel convencional, exponiendo directamente la uva a la corriente de aire, la cual se la hizo variar hasta el máximo valor mencionado en párrafos anteriores. La eliminación de los torbellinos permanentes se la hizo variando el módulo de la velocidad en forma alternada al igual que la dirección de la corriente de aire. En estos ensayos la principal dificultad que se presentó fue

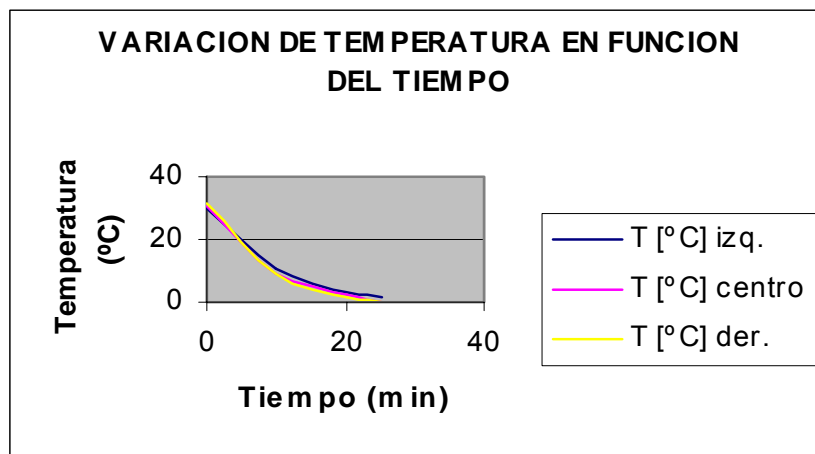
calcular el área de transferencia en ambos sistemas, para lo cual se hicieron simplificaciones que con el transcurso de los ensayos mostraron su validez.

A continuación se muestra en la Tabla 1 y Gráfica 1 la variación de la temperatura de la uva en función del tiempo, además de Fotos 1 que muestran la calidad final de la uva, después de 30 días de haber estado en cámara de mantenimiento, la cual ha sido enfriada con el proceso de refrescamiento directo.

Tabla 1: Temperatura de los diferentes termómetros y la variación del tiempo.

T[°C] Izquierda	T[°C] Centro	T[°C] Derecha	t [min]
30.1	31.1	31.4	0
11.1	9.3	9.1	10
3.3	2.1	1.7	20
1.6	0.3	0.0	25

La grafica resultante de los valores es la siguiente:



Gráfica 1: Valores de temperatura y tiempos obtenidos del ensayo





Foto 1: Las fotos de la izquierda muestran el estado de los racimos de uva antes de ser enfriados con el proceso propuesto, las de la derecha muestran el estado de los racimos, luego de haber sido enfriados por el proceso de aire directo, 30 días después de haber permanecido en la cámara de mantenimiento.

Para los valores obtenidos en las diferentes variables que intervienen en el sistema se determinan los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor para ambos sistemas.

$$U_c = 22,87 \frac{\text{Cal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{Ch}} \qquad U_p = 166,6 \frac{\text{Cal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{Ch}}$$

Como $U_p > U_c$ se ve claramente la mejora en la transferencia de calor.

4.2. Ahorro de tiempo logrado con el proceso propuesto.

En los ensayos experimentales se determinó que 25 kg de uva (cantidad de uva que tiene una caja que se comercializa en el mercado) requieren una superficie promedio de 1,3 m² para ser expuestos al aire y el tiempo que se tardó para llevarlos desde la temperatura ambiente a la de almacenaje fue de 30 minutos ($\Delta t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$). Si se quiere enfriar 7000 kg de uva (10 pallets de 700 kg cada uno) que corresponde una carga completa de un servicio de frío de un túnel tradicional, con el sistema propuesto en un tiempo de 30 minutos se los debería colocar en una superficie de forma tal que queden totalmente expuestos al aire de refrescamiento y además se debería distribuir éste en toda esta área. Claramente se ve lo impracticable de esta posibilidad, por la necesidad de espacio físico y principalmente la imposibilidad de distribuir el aire en la misma.

Un valor de área que se puede considerar aceptable es de 5 m² ya que es factible distribuir en forma uniforme sobre ésta el aire de refrescamiento (cinta transportadora de 1 m x 5 m). Al trabajar con este tamaño de área se debe determinar el tiempo requerido para enfriar los 7000 kg de uva.

En 5 m² se puede enfriar en 30 minutos 416,66 kg, por lo tanto los 7000 kg serán enfriados en 8,4 horas. Es necesario aclarar que se necesitan 16,8 servicios de frío de media hora cada uno para cubrir la demanda (7000 kg) en una cinta de 5 m².

Se puede hacer la Tabla 2 para diferentes tamaños de área de exposición de uva, para 7000 kg de la misma, con un $\Delta t = 30$, $U_p = 166,6 \text{ Cal/m}^2 \text{ }^\circ\text{C h}$, cada servicio tarda 30 minutos. Se debe recordar que 7000 kg de uva en el sistema tradicional son enfriados en 16 horas en promedio.

Tabla 2: Se muestra el ahorro de tiempo que se logra en relación al túnel convencional para diferentes tamaños de área de exposición.

Área de exposición [m ²]	Cantidad de uva por área [kg]	Cantidad de servicios de frío	Tiempo total [h]	Ahorro de tiempo en relación al sistema tradicional [h]
5	416,66	16,8	8,4	7,6
10	833,33	8,4	4,2	11,8
15	1250	5,6	2,8	13,2
20	1666,66	4,2	2,1	13,9

5. AHORRO DE ENERGÍA CON EL SISTEMA PROPUESTO.

Considerando que las pérdidas de carga y de calor que se producen en el sistema tradicional y el propuesto son las mismas, se debe utilizar el mismo equipo de frío para lograr el efecto deseado. Para la cantidad de uva propuesta en el ejemplo en un sistema tradicional se requiere una potencia de motores de 30 HP (entre compresor y forzador). Por lo tanto teniendo en cuenta el tiempo ahorrado de la Tabla 2 se determina el ahorro de energía que se puede lograr en la Tabla 3.

Tabla 3: Se muestra el ahorro energético que se consigue con el nuevo sistema de refrescamiento en relación al sistema tradicional, tanto en valores de energía como en porcentaje.

Ahorro de tiempo en relación al sistema tradicional [h]	Ahorro energético [kW/h]	Porcentaje de ahorro en relación al sistema tradicional [%]
7,6	167,65	47,5
11,8	260,29	73,75
13,2	291,17	82,5
13,9	306,62	86,88

Es necesario mencionar que éste ahorro puede ser mayor dado que las pérdidas en el sistema propuesto son menores ya que por ejemplo el aire no tiene que entrar a presión entre los intersticios de las cajas en el pallet como ocurre en el sistema tradicional. En estudios posteriores se harán los análisis correspondientes a las pérdidas que se producen en ambos sistemas.

6. CONCLUSIONES

El sistema propuesto mejora la calidad final del producto obtenido ya que existe menor deshidratación, dado que el tiempo de exposición de la fruta al flujo de aire es menor. También se evita la proliferación de hongos porque disminuye la humedad dentro de la caja.

El ahorro de tiempo es considerablemente mayor en el sistema propuesto en relación al sistema convencional de enfriamiento de uva. Esto se debe al aumento sustancial del coeficiente de transferencia calor al eliminar los torbellinos permanentes de la corriente de aire directa sobre la uva.

Dado que el ahorro energético que se obtiene es importante se puede concluir que el sistema propuesto contribuye al uso racional de la energía.

7. NOMENCLATURA

ΔQ_{aire} = Variación de calor en el aire de refrescamiento.

ΔQ_{uva} = Variación de calor en la uva a refrescar.

m_{aire} = masa de aire

m_{uva} = masa de uva

cp_{aire} = calor específico aire

cp_{uva} = calor específico de la uva

Δt_{aire} = variación de la temperatura del aire de refrescamiento

Δt_{uva} = variación de la temperatura de la uva a refrescar

U_c = coeficiente global de transferencia de calor en el sistema convencional

U_p = coeficiente de transferencia de calor en el sistema propuesto

A = área de transferencia de calor.

8. REFERENCIAS

[1] López Gómez, A.;. *Las Instalaciones Frigoríficas en las Industrias Agroalimentarias*. A. Madrid Vicente Ediciones, Madrid. AÑO 1994

[2] Cantwell, M.; *Optimal handling conditions for fresh produce*. En: *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Adel A. Kader, Editor. 3ª Edición, University of California. AÑO 2002

[3] Diaz M, Alenda F, Velasco M, Primer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica I CAIM 2008, *Determinación del coeficiente de transferencia de calor en el enfriamiento de uva en fresco en racimos individuales*. UNS Bahía Blanca, AÑO 2008.

[4] Roy Dossat, *Principios de Refrigeración*. Continental S.A., México, AÑO 1973.

[5] Stoecker, W.F., *Refrigeración y Acondicionamiento de Aire*. Mc Graw-Hill, México, AÑO 1980.

[6] Kern Donald Q., *Procesos de Transferencia de Calor*. Continental S.A., México. AÑO 1979