

## **DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ENFRIAMIENTO DE UVA EN FRESCO EN RACIMOS INDIVIDUALES.**

Alenda Francisco, Velasco Marisol, Rojos Esteban, Diaz Terrado Mario

*Departamento Electromecánica Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de San Juan  
Av. Libertador General San Martín 1109 oeste 5400 San Juan e-mail: {alenda; mariod;  
mvelasco; erojos }@unsj.edu.ar*

### **RESUMEN**

El sistema de túnel californiano utilizado para bajar la temperatura de la uva a valores de cámara de conservación toma como unidad de enfriamiento el pallet lo cual afecta la transferencia de calor a causa de la disposición de las cajas en el mismo y los materiales de baja capacidad de conducción del calor que constituyen el embalaje de la uva, lo cual provoca que el enfriamiento de la misma no sea uniforme, además de requerir un tiempo prolongado para lograrlo. Estos factores influyen negativamente en las características organolépticas del producto.

En un trabajo de investigación previo desarrollado por el equipo de investigación se demostró que la uva se podía enfriar a través de un proceso en el cual el aire incide en forma directa sobre la misma obteniéndose mejores resultados de conservación lo cual se reflejó en una menor deshidratación de la uva y una disminución de la probabilidad de formación de hongos, entre otros.

Habiéndose demostrado que el enfriamiento de la uva, tomando como unidad de enfriamiento el racimo individual, da mejores resultados que los obtenidos en un túnel tradicional de pre-frío, el presente trabajo pretende encontrar los coeficientes de transferencia de calor  $U$  en el proceso tradicional que toma como unidad de enfriamiento el pallet, y en el que toma como unidad el racimo individual a través de la metodología experimental.

Como conclusión del presente trabajo se obtiene experimentalmente el valor del coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ) cuando el aire incide en forma directa sobre la uva, el cual puede ser utilizado para casos similares. Otra conclusión a destacar es el porcentaje de mejora del coeficiente de transferencia de calor con el método propuesto en relación al tradicional, permitiendo esto establecer el ahorro energético que se obtiene en el nuevo proceso comparativamente con el túnel californiano.

**Palabras Claves:** Enfriamiento, uva, racimo individual.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En el sistema tradicional de pre-frío (unidad de enfriamiento un pallet) tiene la ventaja de manejar grandes volúmenes de uva correspondientes a distintos campos de producción, además de efectuar packing en finca e ingresar a túnel de pre-frío en forma palletizada. Las desventajas son que el tiempo entre corte, parking, palletizado y la entrada a túnel de pre-frío es muy elevado, a lo que se le debe sumar el tiempo que se tarda en recorrer la distancia que se encuentre el campo de producción del frigorífico. Todo este tiempo en que la uva se encuentra a una temperatura elevada origina una gran deshidratación de la misma. Esta deshidratación produce también pérdida de peso motivo por el cual las cajas se sobrecargan de producto, con la consiguiente pérdida económica. Además al no ser un enfriamiento uniforme dado que las cajas exteriores llegan más rápido a temperatura que las cajas internas, ocasionando que la calidad final de las uvas sea diferente [3, 4].

Hoy por hoy el proceso de enfriamiento de uva para consumo en fresco con destino al mercado externo presenta diferentes problemas, que influyen para que el producto final obtenido no sea competitivo.

Se pretende competir con un producto de buena calidad aprovechando la ventaja competitiva de tener uva temprana (Variedad superior cosechada los primeros días de Diciembre dependiendo de la zona geográfica) en relación a otros competidores [6].

Por otra parte disminuir los costos operativos como ser: mano de obra, energía eléctrica, etc. y disminuir las pérdidas por deshidratación pudiendo perder con esto calidad, precio y peso.

Actualmente es muy importante para las pequeñas y medianas empresas exportadoras de uva en fresco y que no superen una producción de 20000 Kg/día, mejorar el método ya existente para enfriamiento rápido de uva [7].

El objetivo de este trabajo es estudiar el proceso de transferencia de calor con la finalidad de mejorar los tiempos de enfriamiento y determinar los coeficientes de transferencia de calor tanto para el túnel californiano como para el sistema propuesto de forma tal que se lo pueda comparar para cuantificar la mejora lograda.

El método de trabajo utilizado para este informe es a través del análisis teórico y del ensayo experimental. Los resultados obtenidos permiten concluir que el método propuesto mejora el proceso de refrescamiento actual tanto desde el punto de vista de la calidad final del producto como del ahorro energético que se logra.

## **2. DESARROLLO. BASE TEÓRICA**

### **2.1. Capa límite.**

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. 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 (la que se adhiere a la superficie) 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 [5].

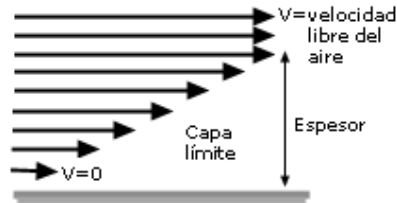


Figura 1: perfil de velocidades en la capa límite.

El espesor de esta capa aumenta progresivamente aguas abajo de la corriente. Su espesor crece progresivamente aguas abajo, 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.

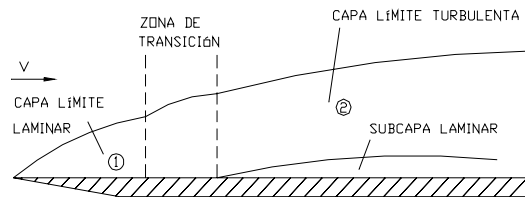


Figura 2: Diferentes desarrollos de la capa límite, pasa de capa límite laminar a capa límite turbulenta.

## 2.2. Desprendimiento y transición

Una de las particularidades destacables de la capa límite es que en determinadas circunstancias la lentitud del movimiento del fluido en ella se acentúa, llegando a producirse su retroceso. Esto provoca la aparición de remolinos intercalados entre el contorno sólido y el movimiento general del fluido, lo que produce que ambos se separen, como si el cuerpo considerado hubiera modificado su forma siguiendo el contorno de los remolinos.

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 [1].

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. El estado de turbulencia puede ser producido por asperezas de la superficie ó grandes perturbaciones. Lo mencionado en el párrafo anterior explica el fenómeno de transición.

Los desarrollos teóricos realizados para capa límite laminar no se los puede aplicar para el caso que la capa límite turbulenta, una de las razones es que las fluctuaciones de la turbulencia causan intercambio de la cantidad de movimiento en el fluido lo que aumenta los esfuerzos ó acentúan los efectos viscosos. Estos esfuerzos no son dependientes de las propiedades del fluido y no pueden predecirse en la misma forma que los esfuerzos debido a la viscosidad del mismo. Por lo tanto las relaciones empleadas en el análisis de capa límite turbulenta, posean una fuerte base empírica [2].

### 2.3. Transferencia de calor. Convección

Un proceso de transferencia de calor por convección se realiza cuando uno de los elementos que intercambia calor es un fluido en movimiento. El movimiento de los fluidos puede realizarse en forma natural o forzada, además este movimiento puede ser en régimen laminar o turbulento de acuerdo al número de Reynolds. En este tipo de mecanismo de transferencia de calor es vital el concepto de capa límite que es la que limita el proceso en sí.

La cantidad de calor intercambiada se puede calcular a través de la siguiente expresión matemática [5]

$$Q = U * A * \Delta t \quad (1)$$

La cantidad de calor que queda o se transfiere de un cuerpo puede ser expresada a través de la siguiente ecuación:

$$Q_c = m * c_p * \Delta t_c \quad (2)$$

### 3. DESARROLLO.

El presente trabajo propone enfriar la uva en forma directa, o sea exponer el racimo de uva en forma directa a la corriente de aire que producirá el refrescamiento. Se sabe que en flujos de aire cuya velocidad es superior a 300 m/min (éste límite puede ser menor) producen deshidratación, por lo cual es necesario trabajar con velocidades menores que la mencionada anteriormente. También se sabe que a velocidad reducida la transferencia de calor es baja, lo cual estaría limitando la efectividad del método propuesto.

Un proceso de enfriamiento más rápido de la uva se puede lograr con un aumento de la velocidad del aire que produce el intercambio de calor y una disminución de la temperatura del mismo, pero ambas medidas son limitadas por los daños que se le puede ocasionar al producto, por lo tanto se debe hacer un análisis más profundo del proceso de intercambio de calor que permita identificar otras variables, dentro del mismo proceso, de forma tal de lograr el efecto deseado.

Teniendo en cuenta la Ecuación (1) aplicada para un  $\Delta t$  y A constantes, se ve que la cantidad de calor intercambiada variará cuando varíe el coeficiente de intercambio de calor por convección h, el cual está íntimamente relacionado con la capa límite. Por lo tanto se hace un

estudio analítico de las condiciones que influyen en el coeficiente de transferencia de calor por convección en la capa límite.

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. Pero la irregularidad produce zonas donde esta capa se despega, separa la corriente de aire de la uva y se forman torbellinos que dificultan la transferencia de calor, motivo por el cual se necesita eliminar estos torbellinos, ver Figura 3.

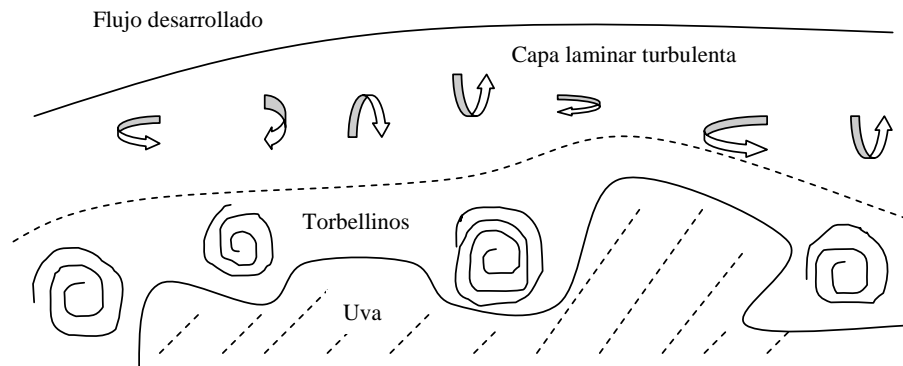


Figura 3: Se puede ver los torbellinos que limitan la transferencia de calor. Considerar que el esquema corresponde a un plano transversal del racimo de uva.

A las partículas que forman el torbellino 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 capa límite sea plenamente turbulenta.

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

#### 4. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL.

El desarrollo experimental pretende demostrar que la transferencia de calor se puede aumentar sin aumentar la velocidad del aire por encima de los valores que pueden producir deshidratación ó disminuir la temperatura del mismo por debajo de aquellos valores que producen congelación en la fruta. En el ensayo se pretende eliminar los torbellinos que son los que limitan la transferencia de calor a través de la variación de la cantidad de movimiento en las partículas de los mismos. Para producir esta variación de la cantidad de movimiento, se hace que la velocidad del flujo de aire varíe entre un valor que se toma como máximo y que es

menor que el máximo que produce deshidratación, y un valor mínimo que es aproximadamente 0,7 del máximo. Esta variación se hace cambiando la velocidad del ventilador en forma cíclica. Los ensayos se realizaron en un túnel californiano tradicional, con diferentes temperatura de aire de refrescamiento que variaba entre 0 y -2,5 °C en diferentes ensayos, las velocidades máximas del aire variaban entre 80 y 190 m/min, las variedades de uvas ensayadas fueron superior, red globe y sultanina.

El ensayo consiste en disponer 10 racimos de uva colgados en un hierro de un metro de ancho y a una altura de 0,95m del piso y a 6 metros de la boca de túnel. A tres de estos racimos se le colocaron termómetros pincha frutas para censar la variación de temperatura. Los mismos se distribuyeron a la izquierda, centro y derecho de la barra.

Los primeros ensayos se hicieron con velocidades constantes cuyo módulo era superior a 300 m/min, y también se mantuvo constante su dirección. Los resultados que se obtuvieron mostraron que se tardaba 30 minutos para alcanzar el 0 °C en la uva, y la misma a los 30 días conservada en cámara de mantenimiento mostraba signos de deshidratación con lo cual se perdían las características necesarias de conservación.

En ensayos posteriores se utiliza una corriente de aire cuya principal característica es que el módulo de la velocidad es variable. De estos se muestra como ejemplo el ensayo donde se enfría uva red globe, cuyos racimos tenían una altura y peso de aproximadamente de 0,35 m y 0,9 kg. respectivamente. La temperatura del aire de refrescamiento es de -2,5°C. Se somete a estas uvas a una corriente de aire cuya velocidad variaba aproximadamente entre 120 y 190 m/min, las cuales se midieron con un anemómetro mecánico de palas para las condiciones de altura y de largo especificadas anteriormente.

Los resultados de uno de los ensayos se muestran tabulados en la Tabla 1, y las variables que se tuvieron en cuenta fueron temperatura y el tiempo.

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

Con los valores obtenidos se obtiene la gráfica de temperatura en función del tiempo, ver Figura 4, para los tres termómetros utilizados para medir la temperatura en los racimos de uvas que estaban expuestos al aire de refrescamiento.

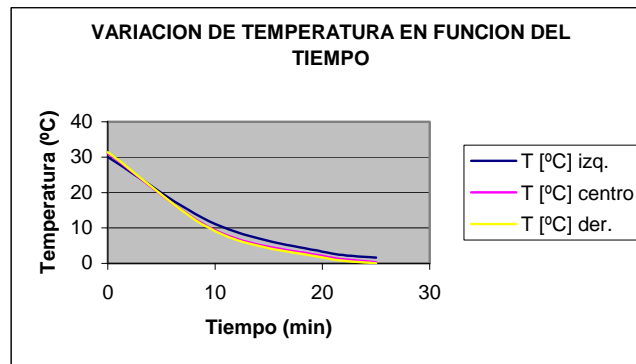


Figura 4. Valores de temperatura y tiempos obtenidos del ensayo para los tres termómetros.

El ensayo indicado demuestra que la transferencia de calor aumenta sin necesidad de aumentar la velocidad del aire por encima de los valores permitidos, obteniendo resultados como los que se muestran en la Figura 5, que corresponde a la uva sacada de la cámara de mantenimiento 30 días después de efectuarse el ensayo.



Figura 5 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.

## 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO.

La curva de la Figura 4 que corresponde al ensayo de refrescamiento rápido de la uva puede ser descripta a través de una ecuación exponencial del tipo

$$T = J * e^{-at} \quad (3)$$

Donde T es la temperatura de la uva para un determinado tiempo t, J es valor donde la curva se corta con el eje de ordenadas, y a es el coeficiente ó tasa de refrescamiento. Para que la Ecuación (3) pueda ser utilizada para cualquier rango de temperaturas que puede tomar la fruta y las mismas condiciones de circulación de aire, se utilizará la ecuación

$$\theta = J * e^{-at} \quad (5)$$

Donde  $\theta$  es la relación adimensional de temperatura, la cual tiene la siguiente expresión.

$$\theta = \frac{T - T_a}{T_i - T_a} \quad (6)$$

Donde T es la temperatura de la uva en cualquier instante,  $T_i$  es la temperatura inicial de la uva,  $T_a$  es la temperatura del aire de refrescamiento.

A través del ajuste exponencial de los datos experimentales se obtuvo los valores de las constantes (J, a) de la Ecuación (5), obteniéndose

$$\theta = 1.0863 * e^{-0.1187t} \quad (7)$$

En la Figura 6 se muestran la gráfica de la curva experimental y la obtenida a través de la Ecuación (5).

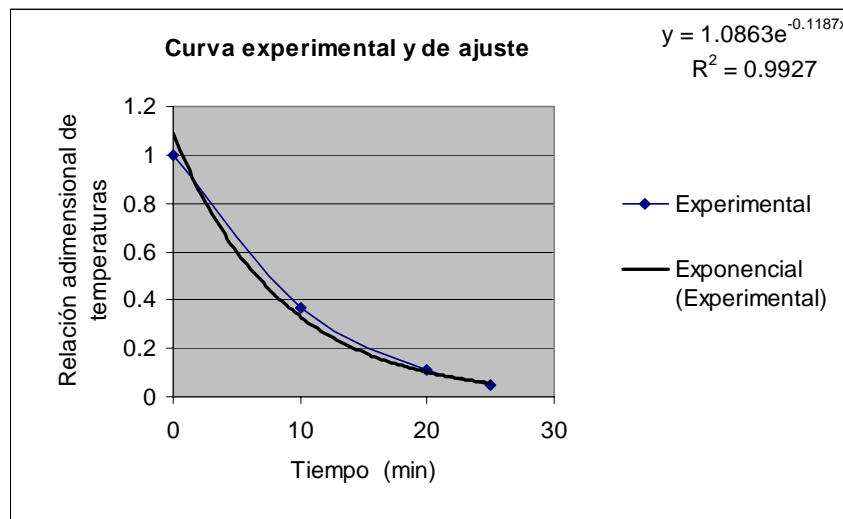


Figura 6 Curva experimental y el ajuste exponencial de la misma.

Con los datos experimentales y con las ecuaciones (1) y (2) se obtuvo el coeficiente de transferencia de calor por convección en el proceso de refrescamiento propuesto, el cual fue

$h_c = 37.21 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este valor fue obtenido considerando que el racimo de es un sólido continuo.

Datos obtenidos de diferentes bibliografías [8] para un túnel californiano cuya velocidad mínima de funcionamiento en los pasillos es de 1.8 m/s, caudal de aire no inferior a  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  por kilo de uva, envases de madera ó cartón, se obtuvieron coeficientes de transferencia de calor por convección en el rango de 8 a  $13 \text{ W/m}^2\text{C}$ ., los cuales pueden ser menores aun, dependiendo de la naturaleza aislante de los materiales usados en el embalaje de la uva.

De la comparación de ambos valores se ve claramente que el coeficiente de transferencia de calor en el sistema propuesto es mayor que el convencional, lo que hace que el nuevo proceso propuesto utilice menor cantidad de energía (menor tiempo de refrescamiento, menor caída de carga en la circulación del aire) para lograr el objetivo.

## **6. CONCLUSIONES**

La transferencia de calor aumenta sin necesidad de aumentar la velocidad del aire que produce el refrescamiento de la uva. La cantidad de movimiento que se le transfiere a las partículas del torbellino de puede hacer a través de la variación del módulo de la velocidad en un determinado rango de valores. Como así también variando la dirección y sentido del mismo, ó por la combinación de los anteriores.

De la comparación de los coeficientes de transferencia de calor (para túnel tradicional y modelo propuesto) se ve claramente la mejora que se obtiene a través del sistema de enfriamiento directo de las uvas. Esta mejora en el valor del coeficiente se ve reflejada en forma directa en un ahorro energético para lograr el mismo efecto.

La uva que se obtuvo después de los 30 días de estacionamiento de la misma en cámara de mantenimiento a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , fue de muy buena calidad, la cual se manifiesta de la siguiente forma:

- baja deshidratación, por consiguiente baja pérdida de peso (3,6 %).
- no se observó daños en las bayas producto de hongos (botritis), pues al salir seca del pre frío se mantuvo seca en la caja de embalaje con el generador respectivo.
- se observó que el raquis, las alitas y los pedicelos conservaban el color verde natural correspondiente a la uva recién cortada.

## **7. REFERENCIAS**

- [1] Roy Dossat, 1973 "Principios de Refrigeración", Editorial Continental S.A. México.
- [2] Stoecker, W.F, 1980 "Refrigeración y Acondicionamiento de Aire", Editorial Mc Graw-Hill, México.
- [3] Manual Ashrae 1990 "Refrigeration System and Applications", American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., Roure 6 S.L. Barcelona.

- [4] López Gómez, A. 1994 “Las Instalaciones Frigoríficas en las Industrias Agroalimentarias”, A. Madrid Vicente Ediciones Madrid.
- [5] Kern Donald Q. 1979 “Procesos de Transferencia de Calor”, Editorial Continental S.A. México.
- [6] Cantwell, M 2002 “Optimal handling conditions for fresh producew. En: Postharvest Technologi of Horticultural” Crops. Adel A. Kader, Editor. 3ª Edición. University of California.
- [7] Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe 1989, “Manual Para el Mejoramiento del Manejo Poscosecha de Frutas y Hortalizas”, Editorial FAO Roma Italia.
- [8] Cané Tomás, Versión Digital de la Revista “Frío y Calor” Número 84 de la Cámara Chilena de Refrigeración y Climatización A.G.