

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN TRES TIPOS DE SECADEROS DE YERBA MATE

Guillermo M. Arndt¹; Marcelo F. Ricci²; Jonatan G. Tetzlaff; Santiago A. Holowaty⁴

¹Investigador. Equipo Yerba Mate y Té. EEA Cerro Azul – INTA. Ruta Nac. 14 km 836. Misiones, Argentina.

Email: arndt.guillermo@inta.gob.ar

²Estudiante. FCEQyN, UNaM, Ruta 12, km 75, Posadas Argentina. Email: riccimarcelf@gmail.com

³Estudiante. FCEQyN, UNaM, Ruta 12, km 75, Posadas Argentina. Email: jonatan.tetzlaff@gmail.com

⁴Docente/Investigador. FCEQyN, UNaM/ CONICET, Ruta 12, km 75, Posadas Argentina. Email:

saholowaty@fceqyn.unam.edu.ar

Resumen: La diferencia en los métodos de procesamiento radica en el sistema de secado adoptado en la etapa, posterior al zapecado, que es similar en todos los establecimientos industriales: las ramas de yerba mate cosechadas se someten a inactivación enzimática, dentro de tambores rotatorios, horizontales con aspas internas, flujo paralelo, con elevada temperatura y corto tiempo de residencia. El objetivo del trabajo fue estudiar la eficiencia térmica y la distribución energética de los equipos utilizados en la etapa de secado en tres establecimientos industriales. Los sistemas adoptados por cada uno fueron diferentes: Secado continuo en cinta, Secado continuo en tambor rotatorio, y secado por lotes (denominado Barbacué). Los tiempos de residencia son diferentes en todos los casos. Se determinaron variables requeridas para la realización de balances de masa y energía en las entradas y salidas de los equipos sólidos y gases, en estado estacionario. La eficiencia y la distribución energética de cada secadero se realizaron en relación a la energía calórica que ingresaba al sistema. La eficiencia se describió como la cantidad de agua evaporada en relación al calor aportado al sistema. Los resultados se compararon con datos de sistemas eficientes obtenidos de la bibliografía. Se determinaron valores de eficiencia bajos en relación a la bibliografía. El secado en cinta mostró valores de 23,3 % de eficiencia, el secadero rotatorio alcanzó valores más bajos, de 19,5 % mientras que el sistema barbacué no superó el 14 % de eficiencia. Los calores de pérdidas fueron elevados, ya que una parte importante de la energía aportada por los gases de combustión al sistema, se utiliza para precalentar aire y enriquecer las corrientes gaseosas. Los porcentajes de corrientes gaseosas de salida resultaron elevados, con un alto contenido de humedad y baja temperatura, lo que no permitiría la posibilidad de reutilizar parte de estas corrientes para recirculación o precalentamiento.

Palabras clave: yerba mate, secado, eficiencia térmica.

Introducción

La producción de yerba mate en Argentina se concentra en el nordeste del país principalmente en la provincia de Misiones y al norte de Corrientes. Este producto se comercializa a lo largo de todo el país y una fracción es exportada.

La elaboración de la yerba mate, consta de 5 etapas: zapecado, secado, molienda gruesa, estacionamiento y molienda fina. Las primeras 3 se llevan a cabo en establecimientos denominados de procesamiento primario (o secadero). La materia prima se obtiene de los diferentes yerbales de la zona, donde podemos distinguir la yerba de monte (norte de misiones) y la de campo (fronteras entre Misiones y Corrientes). En la cosecha, las ramas son cortadas y transportadas en camiones hasta los establecimientos donde se colocan sobre un piso hasta ser procesadas.

Luego se colocan sobre cintas transportadoras que dirigen las ramas hacia el zapecador, este consiste en un tambor rotatorio donde las ramas entran en contacto directo con los gases de combustión (combustible celulósico o gas) en corriente paralela. El tiempo de residencia es relativamente corto entre 2 a 4 minutos y las temperaturas de exposición son altas, permitiendo la inactivación de enzimas que pueden llegar a producir pardeamiento del producto durante las siguientes etapas.

También durante el zapecado se produce una importante pérdida de humedad. Reduciendo así desde un 55% en base húmeda (bh) hasta un 20% (bh) en las hojas y desde 55% (bh) hasta un 50% (bh) en los palos. Esta operación se realiza en condiciones similares en la mayoría de los establecimientos industriales independientemente del sistema de secado utilizado en la etapa siguiente. (Schmalko y Alzamora, 2001).

Las ramas son luego introducidas al secadero, que generalmente es de tipo cinta y pueden tener 1 o 2 etapas. A su vez, las cintas se pueden ubicar en formas superpuestas una arriba de la otra. La temperatura del aire o gases de combustión que ingresan al secadero varía entre 90 y 120 °C, siendo la más usual de 100 °C (Núñez y Känzig, 1995). El tiempo de residencia en general puede variar de 4 a 6 horas según cada establecimiento.

Para el caso de secaderos que tiene una producción de tipo barbacuá generalmente se utilizan secaderos con las mismas características nombradas anteriormente, pero el proceso es discontinuo. Este consiste en cargar las cintas con las ramas a secar y dejarlas estacionarias por un periodo de aproximadamente 18 hs a menor temperatura (80 – 90 °C).

Otro tipo de secadero presente en la industria y que está incluido en este trabajo es el de tipo rotatorio, donde la etapa de secado se lleva a cabo en tambores rotatorios. Estos poseen tiempos de retención muy cortos comparados con los secaderos de cinta, por lo tanto es necesario secar por separado los palos por su mayor contenido de humedad. Este proceso se lleva a cabo por medio de una zaranda en el interior del tambor de secado de hojas, la misma permite pasar las hojas hacia las paredes del tambor y en cambio los palos quedan retenidos dentro de ella, para luego ser dirigidas por medio de cintas transportadoras al tambor secador de palos. Los requerimientos energéticos más importantes en el procesamiento se tienen en las etapas de zapecado y secado. En la Industria de elaboración de yerba mate, los procesos de secado requieren grandes cantidades de energía calorífica obtenida a partir de combustibles celulósicos (leña o chip). Las normativas vigentes limitan el uso de este tipo de combustible cuando se trata maderas de montes nativos, obligando a la utilización de maderas de bosques implantados y/u otros combustibles. Este reemplazo de factor es debido a la escasez de los primeros e implica costos mayores para la industria, de manera que se racionaliza el mismo mejorando la eficiencia del proceso productivo.

El objetivo del trabajo fue estudiar la eficiencia térmica y la distribución energética de los equipos utilizados en la etapa de secado en tres establecimientos industriales: secadero de cintas, secadero discontinuo (barbacuá) y secadero rotatorio.

Metodología

Establecimientos Industriales

El trabajo se realizó en 3 establecimientos de procesamiento primario de la provincia de Misiones.

El primer establecimiento procesaba de manera continua en un secadero de 2 cintas superpuestas. Las cintas de secado tenían una longitud de 30 m y un ancho de 4 m. El secadero estaba construido de mampostería y techo de chapa, donde se ubicaban

Estudio de la eficiencia térmica en tres tipos de secaderos de yerba mate

las chimeneas de salida de los gases. Las ramas forman un lecho de 1 m de altura aproximadamente. Los gases de combustión son introducidos por medio de boquillas localizadas en la parte inferior de la cinta de secado. El combustible utilizado en la etapa de secado fue chip de madera.

El segundo establecimiento procesa de manera discontinua (tipo barbacoá), en un secadero de cinta de similares características al primer establecimiento y utiliza como combustible chip de madera.

El tercer establecimiento, procesaba en un sistema continuo, en un secadero de tambor rotatorio. Como combustible utilizaba leña de monte implantado. El flujo de gases circula en paralelo al flujo de ramas y eran extraídos por una chimenea ubicada al final del tambor.

Mediciones en la línea de producción

Las mediciones se realizaron en régimen constante, donde se tomaron muestras de hoja verde, de las ramas antes de ingresar al secadero y en la salida del mismo para su posterior obtención de humedad. También se midieron la temperatura de las hojas a la entrada y a la salida del secadero. El flujo de ramas se consideró el promedio diario de procesamiento de hoja verde (Schmalko et al., 2003). Estos procedimientos se realizaron por igual en los 3 establecimientos.

Para el caso de los 2 primeros establecimientos también se obtuvieron los datos del flujo de entrada de los gases de combustión midiendo temperatura de bulbo húmedo, temperatura bulbo seco y velocidad de entrada de los gases en la boquilla y del aire que ingresaba por los oídos. Se midió el área, número de boquillas y oídos. Los datos de temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo también fueron tomados en la parte superior del secadero (sobre la cinta superior).

Para el tercer establecimiento se obtuvieron datos del flujo de salida de los gases de combustión a través de la chimenea. Se midió temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, velocidad de flujo y área de la chimenea.

La determinación del contenido de humedad se realizó por calentamiento a 103 ± 2 °C hasta pesada constante (IRAM 20503). La temperatura del aire se midió utilizando termómetros de mercurio (con una precisión de $\pm 0,1$ °C). Se generó el bulbo húmedo con algodón humedecido. En cambio para la medición de temperatura de las ramas se utilizó un pirómetro termómetro infrarrojo con termocupla marca CEM modelo DT8833. Para la determinación de velocidad de flujo se utilizó un medidor tipo ventilador con cuentavueltas, marca Wilh Lambrecht KG, modelo 1400/351028, de origen alemán (con una precisión de ± 1 m/min).

Determinación de la Eficiencia Energética

La determinación de la eficiencia energética se calculó mediante la determinación de los calores involucrados durante el secado, por medio de balances de masa y energía tomando al secadero como un solo volumen de control. Para calcular la energía utilizada para evaporar el agua, se necesita conocer en primer lugar, la cantidad de agua evaporada y el calor latente de evaporación. El primero se obtiene con un balance de masa, mientras que el calor latente de evaporación se obtiene de tablas. Este valor depende de la temperatura (es de 540 kcal/kg de agua evaporada a 100°C) y del contenido de humedad. Cuando el contenido de humedad es bajo (por debajo de 20 %, base seca), se debe considerar un calor adicional de adsorción (en el orden del 10 %). (Schmalko y Alzamora, 2005). También se dan a conocer los datos teóricos aportados por la bibliografía a modo de comparación.

Consideraciones:

- La temperatura de referencia T_0 se hace a 20 °C por conveniencia para los cálculos.
- Los valores de temperatura de producto T_{si} , fueron medidas en promedio.
- Los valores de Y' que no están calculados se estimaron mediante un diagrama psicométrico.

- Los valores de calor de sorción Q_s se extrajeron por regresión de datos experimentales en trabajos de Investigación expresados en la bibliografía.
- El sector de cintas trabaja a temperatura en la parte inferior de 125°C , y esta es la temperatura de trabajo o de ingreso a la cinta. Si bien los gases de combustión que entran están a una temperatura media de 330°C , parte de la energía que contienen estos gases, se utiliza para el calentamiento del aire que ingresa por los oídos a temperatura ambiente T_o (promedio). Hay que destacar que esta temperatura ambiente o de referencia puede cambiar entre 35°C a 0°C según la época del año y entre el día y la noche.

Resultados y Discusiones

En la **Tabla 1** se presentaron los valores y porcentajes de los flujos de calor involucrados en el proceso de secado, como así también los valores aportados por la bibliografía.

Tabla 1. Eficiencia y distribución energética en tres tipos de secaderos comparados con la bibliografía.

Distribución Energética	Valores de la bibliografía (%)	Secadero 1 (Cinta continuo)		Secadero 2 (Cinta Barbacúa)		Secadero 3 (Rotatorio)		
		(kcal/h)	%	(kcal/h)	%	Val. Bibl. (%)	(kcal/h)	%
Calor Generado		1605262,3		992513,2			959116,7	
Evaporación del Agua=Eficiencia	55,0%	373686,9	23,3%	138750,9	14,0%	65,0%	186979,1	19,5%
Salida con el aire	28,0%	537141	33,5%	261997,7	26,4%	20,0%	180395,2	18,8%
Calentamiento del sólido	12,0%	60109,2	3,7%	8711,6	0,9%	10,0%	17641,7	1,8%
Salida con el producto	3,0%	41869,5	2,6%	16775,9	1,7%	3,0%	58612,6	6,1%
Pérdidas de calor*	2,0%	592731,2	36,9%	566125,3	57,0%	2,0%	515334,0	53,7%

*El calor perdido es el total de las perdidas indeterminadas y el necesario para calentar el aire de los oídos de 20 a 125°C .

Los valores de calor son estimativos y están expresados en kcal/kg. Se observó menores eficiencias en los secaderos de barbacúa. No superó el 14 %, es decir, del total aportado al sistema, la mayor parte se utiliza para precalentar (o mezclar) el aire fresco a la temperatura ambiente, y así, lograr una mezcla con gases de combustión adecuados para proveer la fuerza impulsora necesaria para lograr el secado de la yerba mate. Es interesante que los gases de salida salen agotados y la distribución es menor que lo propuesto por la bibliografía. Al realizar mediciones, se observaron temperaturas

Estudio de la eficiencia térmica en tres tipos de secaderos de yerba mate

cercanas a los 50 °C en la salida, y valores de humedad superiores a 0,04 kg agua/kg ss, es decir, cercanos a la saturación.

En el secadero de cinta se presentan mayores valores de eficiencia, de 23,3 % en concordancia con trabajos anteriores (Holowaty et al., 2014), donde se reportan eficiencias similares en secaderos continuos de cinta superpuestas. Se remarca el elevado valor de pérdidas, las cuales se generan al hacer ingresar gases de combustión entre 350 y 380 °C y mezclar con aire frío proveniente de los oídos (las ventanas pequeñas laterales al secadero), para alcanzar valores de 120 °C y la humedad del aire suficientemente baja, para que, cuando se encuentra a menores temperaturas, no se saturen las corrientes gaseosas. Esto ha sido mencionado en trabajos anteriores como causante de baja eficiencia (Holowaty et al. 2014) y es objeto de estudio en la implementación de sistemas de calentamiento o precalentamiento de aire en secaderos de yerba mate. (Holowaty y Schmalko, 2016).

Los secaderos rotatorios, poseen un funcionamiento diferente a los anteriormente descritos, sin embargo los valores de eficiencia son bajos. Por un lado, se observa que las pérdidas son elevadas, en este caso particular, puede deberse a la ausencia de sistemas de aislación en el exterior del tubo metálico. Las eficiencias alcanzaron valores del 19,5 %. En todos los casos, la humedad final de las hojas de salida fueron entre 5 y 5,5% en base seca.

Conclusión

Se estudiaron la eficiencia térmica y la distribución energética en tres tipos de secaderos de yerba mate, que utilizaban el mismo tipo de corriente gaseosa para secar. Se determinó la mayor eficiencia térmica en los secaderos de cinta continuos, seguidos por los secaderos rotatorios y los de lecho fijo o barbacuá. En el caso de cintas continuo y los de barbacuá, las pérdidas elevadas resultan del ingreso de aire frío que se mezcló con los gases de combustión para permitir mejorar la velocidad de secado, a expensas de una disminución en la eficiencia y aumento del consumo energético. En los secaderos rotatorios se observaron marcadas pérdidas, debido a la ausencia de aislantes térmicos en las paredes del secadero.

Agradecimientos

Se extiende el agradecimiento al Instituto Nacional de la Yerba Mate (Argentina) por financiar este proyecto.

Referencias Bibliográficas

- CNOSSE, A.G.; JIMÉNEZ, M.J.;SIEBENMORGEN, T.J. Rice fisuring response to high drying and tempering temperatures. *Journal of Food Engineering*v.59, p. 6169,2003.
- COELHO G.C.; DE ARAUJO, J.E.M.; SCHENKEL, E.P. Population diversity on leaf 240 morphology of maté (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil., Aquifoliaceae). *Brazilian 241 Archive of Biology andTechnology*v.45 (1), p. 47-51, 2002.
- IRAM 20503, Yerba Mate: Determinación de la pérdida de masa a 103°C. Instituto de Racionalización de Materiales,1995.
- KREITH, F. Y BOHN, M. Principles of Heat Transfer, 5th Edition, West Publishing Company,1997.
- KUDRA, T. Energy Aspects in Drying. *Drying Technology*, v. 22, N° 5, p. 917-932, 2004.
- MENSHUTINA, N.V.; GORDIENKO, M.G.; VOYNOVSKIY, A.A.; KUDRA, T. Dynamic Analysis of Drying Energy Consumption. *Drying Technology*, v. 22, N° 10, p.2281-2290,2004.

- MUJUNDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying. 2nd Edition. Marcel Dekker, Inc. New York, 1995.
- NÚÑEZ, J.C. ; KÄNZIG, R.G. Secanza de la Yerba Mate. Erva-Mate: Biología e Cultura no Cone Sul, Editora da Universidade- Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – Brasil, p. 175-180, 1995.
- PERRY, R.H. Y GREEN, D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7° Edition Mc Graw Hill, 1997.
- RAMALLO, L.A.; POKOLENKO, J.J.; BALMACEDA, G.Z.; SCHMALKO, M.E. Moisture diffusivity, shrinkage, and apparent density variation during drying of leaves at high temperatures. En: International Journal of Food Properties v.4, p.163-170, 2001
- SCHMALKO, M.E.; MACIEL, S; DELFEDERICO, L.E. Eficiência energética de un secadero de yerba mate. 3er Congreso Sul-Americano da Erva Mate, Chapecó, Brasil, 16 al 19/11/03.
- SCHMALKO, M.E.; ALZAMORA, S.M. Color, chlorophyll, caffeine and water content variation during Yerba Maté processing. Drying Technology v. 19, 599-610.
- SCHMALKO, M.E.; ALZAMORA, S.M. 2005. Modeling the drying of a twig of "Yerba Maté" considering a composite material: Part I: Shrinkage, apparent density and equilibrium moisture content. Journal of Food Engineering v. 66, 455-461, 2001.
- SCHMALKO, M. E.; PERALTA, J. M.; ALZAMORA, S.M. Modeling the drying of a deep bed of *Ilex paraguariensis* in an Industrial belt conveyor dryer. Drying Technology v.25, p. 1967-1975, 2007.
- SHEI, H.J.; CHEN, Y.L., Computer simulation on intermittent drying of rough rice. Drying Technology v. 20, p. 615-63, 2002.
- TRELA V.D.; HOLOWATY S.A.; SCHMALKO M.E. Estudio cinético en las modificaciones de los parámetros en los distintos estacionamientos de la yerba mate. Libro de Resúmenes IV Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. ISBN-13: 978-987-28845-0-5. p. 415, 2012.