

# **SIMULACIÓN ESTACIONARIA DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO PARA JUGO DE TOMATE**

## **STATIONARY SIMULATION OF A DOUBLE EFFECT EVAPORATOR FOR TOMATO JUICE**

**Álvaro Núñez<sup>1\*</sup>, Enrique Tarifa<sup>1,2</sup>, Norma Farfán<sup>1</sup>**

(1) Universidad Nacional de Jujuy, Facultad de Ingeniería, (2) CONICET,  
Gorriti 237, 4600 San Salvador de Jujuy, Jujuy – Argentina

\*autor de contacto (e-mail: afnunez@fi.unju.edu.ar)

*Recibido: 16/03/2011 - Evaluado: 30/05/2011 - Aceptado: 22/09/2011*

### **RESUMEN**

En este trabajo se desarrolló un modelo estacionario para simular un sistema evaporador de doble efecto destinado a la concentración de jugo de tomate. Debido a que el licopeno muestra capacidad antioxidante, es deseable que su concentración sea máxima en la pasta de tomate. Ello se logra optimizando tanto el diseño como las condiciones de operación del equipo concentrador de jugo. Para alcanzar ese objetivo, se incorporó al modelo la cinética de degradación del licopeno, y se realizó un estudio de sensibilidad para determinar las relaciones que vinculan las variables de proceso. El estudio determinó que el contenido de licopeno en el producto es altamente sensible al tiempo de residencia; mientras que el consumo de vapor está determinado por la presión del vapor de servicio y las presiones de los efectos.

### **ABSTRACT**

In this paper, a model to simulate a stationary double-effect evaporator for the concentration of tomato juice was developed. Due to lycopene shows antioxidant capacity, it is desirable its maximum concentration in the tomato paste. This is achieved by optimizing both the design and operating conditions of the juice concentrating unit. To reach this goal, the degradation kinetics of lycopene was incorporated into the model, and a sensitivity analysis was performed to determine the relationships which link together the process variables. The study showed that lycopene content in the product is highly sensitive to the residence time, while the steam consumption is determined by the vapor service pressure and the effect pressures.

Palabras clave: tomate; licopeno; simulación; optimización

Keywords: tomato; lycopene; simulation; optimization

## INTRODUCCIÓN

Uno de los productos derivados del tomate es el jugo concentrado, obtenido mediante el proceso de evaporación. Según Ramaswamy (2006), la evaporación es una operación unitaria empleada para remover agua en forma de vapor de los alimentos líquidos diluidos para obtener un producto líquido concentrado. Esta operación requiere de un evaporador o varios evaporadores dispuestos en un arreglo específico, el cual está limitado por las características fisicoquímicas de la materia prima y del producto terminado (Toledo, 2006). En el caso particular del jugo de tomate, la concentración del mismo debe realizarse en contra corriente.

El proceso de concentración por evaporación puede ser analizado haciendo uso de la modelación matemática con la finalidad de facilitar su comprensión y representación. Existe una gran variedad de modelos matemáticos para evaporadores múltiple-efectos (Cadet *et al.*, 1999; Riverol & Napolitano, 2000; Runyon *et al.*, 1991; Tonelli *et al.*, 1990). Normalmente, la principal diferencia entre los distintos modelos matemáticos es el conocimiento heurístico utilizado para su desarrollo. Las hipótesis incluidas en estos modelos están generalmente relacionadas con el cálculo de propiedades termo-físicas o algún parámetro específico –coeficiente global de transferencia de calor, área de transferencia, calor latente de evaporación o masa en cada efecto– (Miranda & Simpson, 2005; Yadav & Jana, 2010).

El tomate tiene bajo valor calórico (17 cal/100 g). Se caracteriza por un elevado contenido de agua (90 - 94%), un importante contenido de azúcares solubles (fructuosa, glucosa y sacarosa); menor proporción de proteínas, fibras y ácidos orgánicos (cítrico y málico); y un destacado aporte de vitaminas (A y C), carotenoides y minerales (USDA, 1999). Uno de los carotenoides más importantes contenidos en el tomate es el licopeno, que es el que le confiere su coloración roja, no tiene actividad pro-vitamina A, pero muestra una capacidad antioxidante dos veces más alta que el  $\beta$ -caroteno, por lo que su presencia en la dieta es considerada de gran interés (Olmedilla, 1999; Le Manguer, 2000).

En el presente trabajo se desarrolla un modelo estacionario de un sistema de concentración de jugo de tomate de doble efecto, con el cual se lleva a cabo un análisis de sensibilidad mediante simulación a fin de determinar las relaciones existentes entre las variables del proceso. En especial, se analizan las posibles variables que disminuyen la concentración de licopeno en el producto final. Para hacer posible este estudio, el modelo desarrollado incorpora la cinética de degradación del licopeno.

## MODELO MATEMÁTICO

La Fig.1 muestra el proceso a simular, se trata de un evaporador doble efecto para concentrar jugo de tomate. El equipo está compuesto por dos evaporadores, E-1 y E-2, dos intercambiadores de calor, IC-1 e IC-2 y la bomba B-1. El proceso es en contracorriente, la alimentación ingresa en E-2 con un flujo másico  $W_{L3}$ , mientras se suministra calor empleando vapor saturado que ingresa en el intercambiador de calor IC-1 con un flujo másico  $W_{V0}$ . El vapor producido en el evaporador E-1 es introducido al intercambiador IC-2 para producir la evaporación del jugo de tomate en el evaporador E-2, a una presión menor que E-1, lográndose así una economía de energía. En E-2 se realiza la primera evaporación parcial, llegándose a la concentración final en E-1. Debido a la diferencia de presiones entre los evaporadores E-1 y E-2, el jugo de tomate debe ser introducido al primer efecto mediante la bomba B-1.

El proceso de evaporación involucra transferencias de masa y de energía. El jugo de tomate puede suponerse como una solución binaria de agua y sólidos solubles, ambos considerados inertes químicamente. Para desarrollar el modelo se adoptan las siguientes hipótesis:

- Estado estacionario.
- Temperatura y composición homogénea dentro de cada evaporador.
- Pérdidas de calor despreciables.
- Elevaciones del punto de ebullición despreciables.
- El vapor se condensa totalmente.

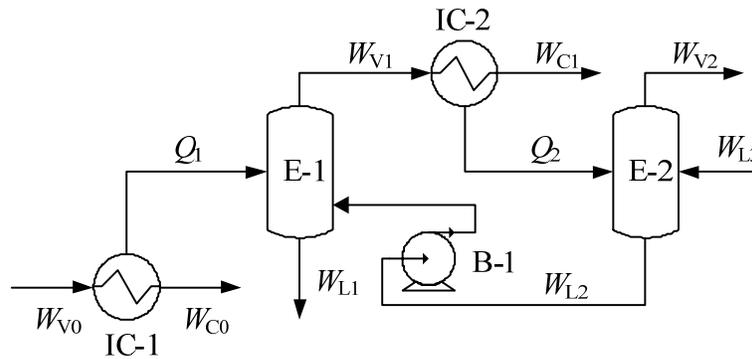


Fig. 1: Diagrama del proceso.

Para el proceso descrito, en estado estacionario, la ecuación de balance de masa para un evaporador  $i$  es:

$$W_{L_{i+1}} - W_{L_i} - W_{V_i} = 0 \quad (1)$$

donde  $W_L$  (kg/h) es el flujo másico de líquido y  $W_V$  (kg/h) es el flujo másico de vapor.

El balance de sólidos solubles en el efecto  $i$  es:

$$W_{L_{i+1}} w_{L_{i+1}} - W_{L_i} w_{L_i} = 0 \quad (2)$$

donde  $w$  es la fracción másica de sólidos (kg ss/kg).

El balance de energía para el evaporador  $i$  es:

$$W_{L_{i+1}} H_{L_{i+1}} - W_{L_i} H_{L_i} - W_{V_i} H_{V_i} + Q_i = 0 \quad (3)$$

donde  $H_L$  (kJ/h) es la entalpía del líquido y  $H_V$  (kJ/h) es la entalpía del vapor.  $Q$  (kJ/h) es el flujo de calor, y se obtiene de resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Q_i - UA_i (T_{V_{i-1}} - T_{L_i}) = 0 \quad (4)$$

$$Q_i - W_{V_{i-1}} (H_{V_{i-1}} - H_{C_{i-1}}) = 0 \quad (5)$$

donde  $UA$  (kJ/(h °C)) es el producto del coeficiente de transferencia de energía por el área de transferencia,  $T_L$  (°C) es la temperatura del líquido,  $T_V$  (°C) es la temperatura del vapor y  $H_C$  (kJ/h) es la entalpía del condensado.

Debido a que el aumento ebulloscópico es despreciable, se puede plantear:

$$T_{L_i} = T_{V_i} \quad (6)$$

La entalpía  $H_L$  de la pasta de tomate se puede estimar a partir de la composición  $w_L$  y de la temperatura  $T_L$  utilizando la siguiente expresión (Tonelli *et al.*, 1990):

$$H_{L_i} = (4.184 - 2.9337 w_{L_i}) T_{L_i} \quad (7)$$

El vapor se considera saturado dentro de cada efecto. Para estimar sus propiedades se emplearon las siguientes correlaciones con datos obtenidos de Perry (2008), que permiten una estimación de las propiedades del vapor con un error menor al 1%.

Para  $7 \text{ kPa} \leq P < 34 \text{ kPa}$ :

$$T_{Vi} = 32,5515 \cdot P_i^{0,2898} - 17,7778 \quad (8)$$

Para  $34 \text{ kPa} \leq P \leq 307 \text{ kPa}$ :

$$T_{Vi} = 39,0514 \cdot P_i^{0,2382} - 17,7778 \quad (9)$$

Para  $40 \text{ °C} \leq T_v \leq 135 \text{ °C}$ :

$$H_{Vi} = 2509,2888 + 1,6747 T_{Li} \quad (10)$$

$$H_{Ci} = 4,1868 T_{Li} \quad (11)$$

En cuanto al licopeno, asumiendo mezcla perfecta y velocidad de degradación de primer orden, se obtiene:

$$W_{Li+1} w_{Li+1} y_{Li+1} - W_{Li} w_{Li} y_{Li} - k_i M_i w_{Li} y_{Li} = 0 \quad (12)$$

donde  $M$  (kg) es la masa de jugo en el efecto,  $y$  (kg lic/kg ss) es la fracción másica de licopeno en base seca y  $k$  (1/h) es la constante cinética de degradación del licopeno. Esta última constante se estima de la siguiente manera (Goula & Adamopoulos, 2006):

$$k_i = 0,121238 e^{1,88(1-x_{Li})} e^{\left(\frac{-2317}{T_{Li}+273,1}\right)} \quad (13)$$

válida para  $0 < x_{Li} < 0,45$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo presentado en la sección anterior se implementó utilizando el software E-Z Solve (® Intellipro, Inc), el cual es un utilitario para la resolución de sistemas de ecuaciones. Para reducir el grado de libertad (cantidad de variables menos cantidad de ecuaciones) a cero, se especificaron como datos las variables que se presentan en la Tabla 1. Se debe destacar que en todo el estudio se supone que la concentración final del extracto es constante e igual al valor definido por norma para el producto final, esto es, igual a 0.3.

Tabla 1: Datos del modelo

Variable	Valor
$W_{L3}$	800 kg/h
$w_{L3}$	0.05
$y_{L3}$	0.01
$T_{L3}$	30 °C
$w_{L1}$	0.3
$M_1$	500 kg
$M_2$	500 kg
$P_3$	125 kPa
$P_2$	15 kPa
$P_1$	35 kPa

Con estos datos, luego de la simulación, se obtuvieron los valores reportados en Tabla 2. Los resultados de la Tabla 2 concuerdan con los obtenidos por otros autores (Miranda, 2005; Yadav & Jana, 2010), lo que valida el modelo presentado. Como se puede observar en la Tabla 2, se produce una considerable pérdida de licopeno en el proceso.

Tabla 2: Resultados en el estado estacionario

Variable	Valor
$W_5$	381.782 kg/h
$UA_1$	26556 kJ/°C·h
$UA_2$	19043 kJ/°C·h
$W_{L1}$	133.333 kg/h
$y_{L1}$	$8.56 \times 10^{-3}$ kg Lic/kg ss

En la sección siguiente se realiza un estudio de sensibilidad de la solución encontrada con el fin de estimar las variables que más afectan a la concentración final de licopeno, al consumo de vapor y a los del  $UA$  requeridos por los equipos.

#### Análisis de sensibilidad

Una forma de analizar la sensibilidad es calculando la sensibilidad absoluta  $S$  y la sensibilidad relativa  $S_r$ . La sensibilidad absoluta de una variable dependiente  $y$  con respecto a una variable independiente  $x$  se define como sigue:

$$S = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (14)$$

Si no se dispone de una expresión analítica que describa la relación entre dichas variables, la sensibilidad puede ser aproximada de las siguientes maneras, en donde  $h$  es un valor positivo que es empleado para modificar el valor de la variable independiente:

$$S^+ = \frac{y(x+h) - y(x)}{h} \quad (15)$$

$$S^- = \frac{y(x) - y(x-h)}{h} \quad (16)$$

$$S^0 = \frac{y(x+h) - y(x-h)}{2h} = \frac{S^- + S^+}{2} \quad (17)$$

Las expresiones anteriores representan las posibles alternativas que pueden ser utilizadas para aproximar la derivada en el punto donde se desea averiguar la sensibilidad; ellas son aproximación por derecha, por izquierda y central, respectivamente.

Por otra parte, la sensibilidad relativa se define como:

$$S_r = \frac{x}{y(x)} \frac{\partial y}{\partial x} \quad (18)$$

Nuevamente, si no se dispone de la expresión analítica que describe la dependencia de  $y$  con respecto a  $x$ , se pueden utilizar las siguientes aproximaciones:

$$Sr^+ = \frac{x}{y(x)} \frac{y(x+h) - y(x)}{h} = \frac{x}{y(x)} S^+ \quad (19)$$

$$Sr^- = \frac{x}{y(x)} \frac{y(x) - y(x-h)}{h} = \frac{x}{y(x)} S^- \quad (20)$$

$$Sr^0 = \frac{x}{y(x)} \frac{y(x+h) - y(x-h)}{2h} = \frac{x}{y(x)} \frac{S^- + S^+}{2} = \frac{Sr^- + Sr^+}{2} \quad (21)$$

Al ser adimensional, la sensibilidad relativa permite comparar las sensibilidades que involucran diferentes variables.

El  $h$  debe ser elegido lo suficientemente grande para que produzca una variación apreciable en  $y$ , pero no demasiado grande porque entonces no se lograría estimar en forma correcta la derivada. Suponiendo que se elige un  $h$  que produce una perturbación equivalente al 10% de  $W_{L3}$ , esto es 80 kg/h, la Tabla 4 muestra las aproximaciones posibles para la sensibilidad del contenido de licopeno  $y_{L1}$  del producto con respecto a  $W_{L3}$ .

Tabla 4: Análisis de sensibilidad del contenido de licopeno  $y_{L1}$  con respecto a la variación de  $W_{L3}$

	-	0	+
$W_{L3}$	720	800	880
$y_{L1}$	$8.42 \times 10^{-3}$	$8.56 \times 10^{-3}$	$8.67 \times 10^{-3}$
$S$	$1.74 \times 10^{-6}$	$1.60 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-6}$
$Sr$	$1.63 \times 10^{-1}$	$1.49 \times 10^{-1}$	$1.36 \times 10^{-1}$

Las sensibilidades calculadas muestran que el contenido de licopeno es un 20% más sensible a una disminución del caudal de entrada al tren de evaporadores que al aumento del mismo.

Tabla 5: Sensibilidad absoluta  $S$  ( $10^{-1}$ ) para la variable de salida  $W_S$

Variable	-	0	+
$M_1$	0.00	0.00	0.00
$M_2$	0.00	0.00	0.00
$P_1$	4.28	4.12	3.97
$P_2$	- 3.69	- 3.57	- 3.45
$W_{L3}$	4.77	4.77	4.77
$T_{L3}$	- 7.34	- 7.35	- 7.35
$P_S$	1.04	1.01	0.97

Tabla 6: Sensibilidad absoluta  $S$  ( $10^{-6}$ ) para la variable de salida  $y_{L1}$

Variable	-	0	+
$M_1$	- 1.95	- 1.92	- 1.90
$M_2$	- 0.62	- 0.61	- 0.61
$P_1$	-11.8	-11.5	-11.1
$P_2$	- 7.61	- 7.41	- 7.21
$W_{L3}$	1.74	1.60	1.46
$T_{L3}$	- 0.37	- 0.37	- 0.37
$P_S$	0.00	0.00	0.00

El mismo estudio se repitió para estimar la sensibilidad de cada variable de salida (variables dependientes  $y$ ) con respecto a cada variable de entrada (variables independientes  $x$ ). Las Tablas 5, 6, 7 y 8 reflejan la sensibilidad absoluta, mientras las Tablas 9, 10, 11 y 12 las sensibilidades relativas.

Tabla 7: Sensibilidad absoluta  $S (10^2)$  para la variable de salida  $UA_1$

Variable	-	0	+
$M_1$	0.00	0.00	0.00
$M_2$	0.00	0.00	0.00
$P_1$	5.24	5.40	5.55
$P_2$	- 0.26	- 0.25	- 0.24
$W_{L3}$	0.33	0.33	0.33
$T_{L3}$	- 0.51	- 0.51	- 0.51
$P_S$	- 2.22	- 1.97	- 1.71

Tabla 8: Sensibilidad absoluta  $S (10^2)$  para la variable de salida  $UA_2$

Variable	-	0	+
$M_1$	0.00	0.00	0.00
$M_2$	0.00	0.00	0.00
$P_1$	- 3.06	- 2.81	- 2.57
$P_2$	0.34	0.33	0.32
$W_{L3}$	0.24	0.24	0.24
$T_{L3}$	3.77	4.05	4.33
$P_S$	0.00	0.00	0.00

Tabla 9: Sensibilidad relativa  $Sr (10^{-2})$  para la variable de salida  $W_S$

Variable	-	0	+
$M_1$	0.00	0.00	0.00
$M_2$	0.00	0.00	0.00
$P_1$	3.92	3.78	3.64
$P_2$	- 1.45	- 1.40	- 1.35
$W_{L3}$	100	100	100
$T_{L3}$	- 5.77	- 5.77	- 5.77
$P_S$	3.41	3.30	3.18

Tabla 10: Sensibilidad relativa  $Sr (10^{-1})$  para la variable de salida  $y_{L1}$

Variable	-	0	+
$M_1$	- 1.14	- 1.12	- 1.11
$M_2$	- 0.36	- 0.36	- 0.36
$P_1$	- 0.48	- 0.47	- 0.46
$P_2$	- 0.133	- 0.13	- 0.126
$W_{L3}$	1.63	1.49	1.36
$T_{L3}$	- 0.01	- 0.01	- 0.01
$P_S$	0.00	0.00	0.00

Tabla 11: Sensibilidad relativa  $Sr$  ( $10^{-1}$ ) para la variable de salida  $UA_1$

Variable	-	0	+
$M_1$	0.00	0.00	0.00
$M_2$	0.00	0.00	0.00
$P_1$	6.91	7.11	7.32
$P_2$	- 0.15	- 0.14	- 0.13
$W_{L3}$	100	100	100
$T_{L3}$	- 0.58	- 0.58	- 0.58
$P_S$	-10.50	- 9.27	- 8.07

Tabla 12: Sensibilidad relativa  $Sr$  ( $10^{-1}$ ) para la variable de salida  $UA_2$

Variable	-	0	+
$M_1$	0.00	0.00	0.00
$M_2$	0.00	0.00	0.00
$P_1$	- 5.63	- 5.17	- 4.72
$P_2$	0.27	0.26	0.25
$W_{L3}$	100	100	100
$T_{L3}$	5.93	6.38	6.82
$P_S$	0.00	0.00	0.00

Como se puede observar en la Tabla 6, la concentración de licopeno es sensible a  $M_1$  y a  $W_{L3}$  debido a que ellas determinan el tiempo de residencia en el efecto que mayor temperatura tiene, y que por lo tanto más afecta al contenido de licopeno. En base a estos resultados, se puede prever que un aumento en la masa contenida en ambos efectos puede disminuir la degradación del licopeno. Para estimar el efecto sobre la concentración de licopeno  $y_{L1}$  que tiene un aumento simultáneo de  $M_1$  y  $M_2$  de 100 kg, se utiliza la sensibilidad absoluta (+) para cada una de las variables a analizar y se realiza una combinación lineal para obtener la nueva concentración final de licopeno:

$$M_1 : 100 \times -1.90 \times 10^{-6} = -1.90 \times 10^{-4}$$

$$M_2 : 100 \times -0.61 \times 10^{-6} = -0.61 \times 10^{-4}$$

$$8.56 \times 10^{-3} + (-1.90 \times 10^{-4}) + (-0.61 \times 10^{-4}) = 8.31 \times 10^{-3}$$

Por otra parte, las sensibilidades relativas muestran que el consumo de vapor  $W_S$  y los  $UA$  dependen notablemente de las presiones de trabajo de cada efecto, así como también del caudal  $W_{L3}$  y temperatura  $T_{L3}$  de la corriente de jugo a concentrar. Las restantes condiciones,  $y_{L3}$  y  $W_{L3}$ , de esta corriente no pueden ser manipuladas; motivo por el cual no fueron consideradas como variables independientes en el estudio de sensibilidad realizado.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un modelo de evaporador de dos efectos en el que se incluye la velocidad de degradación del licopeno. Se realizó un análisis de sensibilidad de las variables más importante con el objeto de poder ajustar dichos parámetros y optimizar el desempeño del sistema.

Del estudio surgió que las variables que más afectan al contenido de licopeno son  $M_1$ ,  $M_2$  y  $W_{L3}$  ya que éstas determinan el tiempo de residencia dentro de cada efecto. Se determinó también que el consumo de vapor  $W_S$  y los  $UA$  son principalmente afectados por  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_S$ ,  $T_{L3}$  y  $W_{L3}$ .

Por lo tanto, las variables que deben ser consideradas como variable de decisión importantes para realizar la optimización del proceso son  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_S$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $T_{L3}$  y  $W_{L3}$ .

## REFERENCIAS

1. Cadet, C., Toure, Y., Gilles, G. & Chabriat, J.P. (1999). Knowledge modeling and non-linear predictive control of evaporators in cane sugar production plants. *Journal of Food Engineering*, 40 (1/2), 59-70.
2. Goula, A. & Adamopoulos, K. (2006). Prediction of Lycopene degradation during a drying process of tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, 74 (1), 37-46.
3. Le Manguer, M. (2000). Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. *Crit. Rev. Biotech.*, 20 (4), 293-334.
4. Miranda, V. & Simpson, R. (2005). Modeling and simulation of an industrial multiple effect evaporator: tomato concentrate. *Journal of Food Engineering*, 66 (2), 203-210.
5. Oldemilla, B. (1999). Licopeno: Fuentes Dietéticas y biodisponibilidad en los humanos. *Ibérica Actualidad Tecnológica*, 424, 535-540.
6. Perry, J. (2008). Chemical Engineers Handbook. Editorial Mc Graw-Hill, USA, pp. 2-413.
7. Ramaswamy, H. (2006). *Food Processing: Principles and Applications*. Editorial CRC Press, pp. 72.
8. Riverol, C. & Napolitano, V. (2000). Non-linear Control of an evaporator using an error trajectory technique. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 75, 1047-1053.
9. Runyon, C.H., Rumsey, T.R. & McCarthy, K.L. (1991). Dynamic simulation of a non-linear model of a double effect evaporator. *Journal of Food Engineering*, 14, 185-201.
10. Toledo, R. (2006). Fundamentals of Food Process Engineering. Third Edition, Springer Science+Business Media, pp. 413-428.
11. Tonelli, S., Romagnoli, J. & Porras, J. (1990). Computer package for transient analysis of industrial multiple-effect evaporators. *Journal of Food Engineering*, 12 (4), 267-281.
12. USDA, (1999). Nutrient Data laboratory for Standard Reference. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Beltsville Human Nutrition Research Center. NDL Bulletin Board.
13. Yadav, P. & Jana, A.K. (2010). Simulation and Control of a Commercial Double Effect Evaporator: Tomato Juice. *Chemical Product and Process Modeling*, 5(1), <http://www.bepress.com/cppm/vol5/iss1/6>. DOI: 10.2202/1934-2659.1443.

