

## Producción simultánea de azúcar y alcohol: optimización energética incluyendo concentración de vinaza

Oscar A. Díez\*, Marcos N. Russo\*, Romina A. Salazar\* y R. Marcelo Ruiz\*

### RESUMEN

A partir del análisis comparativo de diferentes escenarios en la producción simultánea de azúcar y alcohol, donde la totalidad de la vinaza producida es concentrada a 35°Brix, la optimización energética pudo ser factible al resolverse la composición del mosto fermentado mediante una mezcla de jugo tratado, melado y miel final, logrando en esta última la máxima concentración de sólidos no azúcares y una baja pureza. El aporte de azúcares faltantes se realizó con las otras corrientes mencionadas, de manera tal de minimizar la dilución para lograr un mosto capaz de producir el producto previsto con la máxima concentración de alcohol posible.

**Palabras clave:** azúcar y alcohol de caña, optimización energética.

### ABSTRACT

#### Simultaneous production of sugar and alcohol: energy optimization including vinasse concentration

From the comparative analysis of different scenarios in the simultaneous production of sugar and alcohol, where all the vinasse produced is concentrated at 35°Brix, energy optimization is feasible, if the composition of the fermented must is solved by a mixture of treated juice, syrup and final molasses, achieving in the latter the maximum concentration of non-sugar solids and low purity. The supply of missing sugars was carried out with the other currents mentioned in order to minimize the dilution to obtain a worth capable of producing the expected product with the maximum concentration of alcohol possible.

**Key words:** sugar, alcohol, sugarcane, energy optimization.

*Fecha de ingreso: 25/11/17 - Fecha de aceptación: 18/01/18*

---

\* Área Industrial. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Tucumán. e-mail: oadiez@eeaoc.org.ar

## INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del aumento del corte con bioetanol en los combustibles para motores Otto, las destilerías de vinos obtenidos de la fermentación de mostos azucarados procedentes de la industrialización de la caña de azúcar aumentaron notablemente su producción, marcando en el primer cuatrimestre de 2017 un aumento del 72,78% en comparación con el mismo período del 2016, y las ventas de alcohol proveniente de la caña de azúcar para corte de naftas aumentaron un 53,26%. Este hecho, que junto a la previsibilidad de que el alza en la demanda de alcohol anhidro será sostenida en los próximos años (Ministerio de Agroindustria de la Nación, 2017), impulsó la ampliación de la capacidad de las destilerías.

El nuevo escenario puso los ingenios en el apremio de modificar sus objetivos productivos y transformar la naturaleza esencialmente azucarera de estos hacia una industria generadora de alimentos y energía, lo que llevó a un nuevo esquema de fabricación y consumo de energía.

Tal es así que en el año 2011 Diez *et al.* publicaron un trabajo que contempla el escenario de producción simultánea de azúcar y alcohol, analizando diferentes alternativas en busca de un óptimo energético y teniendo en cuenta la calidad de la materia prima, la relación azúcar/alcohol producida y las fuentes azucaradas para la preparación del mosto. El aumento de la producción de alcohol y de la capacidad instalada conlleva una mayor demanda de vapor, haciendo necesario mejorar la eficiencia a los fines de evitar inversiones en calderas nuevas y/o aumentar el consumo de gas natural.

Como consecuencia de la elevada generación de vinaza por litro de alcohol (los valores medios se encuentran entre 10 y 15, según informan Cortez *et al.* en el año 1995), el tratamiento de la misma consiste aún en la disposición agrícola, con su respectivo costo de logística y combustible fósil, siendo esto último un aspecto delicado si se considera que el objetivo es generar energía renovable para disminuir el consumo de energía fósil.

Para minimizar el impacto negativo del aumento de la producción de etanol, dos industrias azucareras de la

provincia de Tucumán cuentan ya con un concentrador de vinaza, elevando la concentración de esta hasta los 35°Brix. Ante la posibilidad de implementar la concentración de vinaza como pre-tratamiento, es evidente que la modificación en la proporción de azúcar y alcohol a producir a partir de una misma materia prima bajo un mismo proceso productivo impactará en las características de la vinaza y su carga contaminante, dado que al aumentar la pureza del mosto a fermentar, la vinaza generada tendrá menor concentración, requiriendo más energía si se optara por su concentración.

Teniendo en cuenta este escenario, por lo menos en el corto plazo se espera que la vinaza sea concentrada para su compostaje o disposición en campo, llegando así a un aumento en el consumo de vapor, lo que vuelve a modificar las condiciones de operación de los complejos sucro – alcoholeros.

En este trabajo se propone una metodología de cálculo para el óptimo uso de la energía, buscando definir la razón azúcar/alcohol a fabricar por unidad de materia prima, y cuál sería el origen y proporción de las corrientes azucaradas a fermentar que maximicen la eficiencia de la transformación de los azúcares en etanol con una mínima dilución.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de esta metodología de análisis se consideró una fábrica tipo de azúcar blanco directo con destilería anexa alimentada con vapor de escape, capaz de procesar 15.000 toneladas de caña por día (TCD). Los valores considerados para esa fábrica fueron obtenidos a partir de datos históricos relevados de planta.

Para conceptualizar el problema y analizar la sensibilidad de las variables se analizaron diferentes escenarios productivos (Tabla 1) que son descriptos con mayor detalle a continuación:

**Escenario A:** máxima producción de azúcar con elaboración de alcohol a partir de melaza con pureza de 42,5%.

**Escenario B:** máxima producción de alcohol sin elaboración de azúcar (destilería autónoma).

Tabla 1. Diferentes escenarios productivos considerados en este estudio.

Escenario	Distribución Jugo [%]		Efectos Evap.	Melado [%] Alcohol	Bx [%] Alimentación	Bx [%] final mosto	ALC % Vol vino	Nro. Templas	Pureza Miel final
	Azúcar	Alcohol							
A	100	0	5	0	92	31	8,1	3	42,5
B	0	100	1	0	20	20	8,0		
C	70	30	5	0	23	23	7,9	3	42,5
D	85	15	5	0	35	23	7,9	2	60,0
E	40	60	5	50	20	20	7,9	3	42,5

**Escenario C:** producción intermedia de etanol empleando una mezcla de jugo tratado y miel agotada o melaza con pureza de 42,5% (empleo de sistema de tres templas).

**Escenario D:** idéntica producción intermedia de etanol que en el escenario C, empleando una mezcla de jugo tratado y miel no agotada con pureza de 60% (empleo de sistema de dos templas).

**Escenario E:** producción de etanol a partir de una mezcla compuesta por melaza con pureza de 42,5%, jugo tratado y melado de 65°Brix.

Para la resolución de los balances de masa fue necesario fijar algunos parámetros vinculados a la materia prima a procesar, como también las capacidades y eficiencias de los procesos, pudiéndose ver estos en la Tabla 2.

Se emplearon tres simuladores para la resolución de los requerimientos energéticos (vapor) de los escenarios planteados, todos ellos desarrollados por la EEAOC. El software SIMCE (EEAOC,2005), para los

cálculos correspondientes a la etapa de calentamiento – evaporación; mientras que el software CALCO (EEAOC, 2003) facilita la resolución de los sistemas de cocimientos. La descripción y uso de los mencionados simuladores se explica en Diez *et al.* (2011).

Finalmente, el software SICOVIN (EEAOC, 2010) determina los consumos de vapor para la concentración de vinaza, simulando un sistema de evaporación de múltiple efecto de hasta cinco etapas. La descripción y uso de este simulador se explica en Diaz *et al.* (2013).

Con los resultados obtenidos en los diferentes simuladores se formularon los respectivos diagramas de distribución de vapor utilizando una planilla Excel, y se resolvieron los balances en cada colector de vapor mediante el uso del comando Solver.

**Optimización de la mezcla a fermentar:** para la determinación de los flujos que componen el mosto a fermentar se esquematizó el sistema en Excel (Figura 1), optimizando la composición de la mezcla a través de la herramienta Solver, minimizando el volumen final de

Tabla 2. Valores de referencia para resolución de los balances de masa.

MOLIENDA		TRATAMIENTO JUGO		PROCESO	
Caña molida [TCH]	625	SO <sub>2</sub> [ppm]	600	Bx Melado [%]	65
Fibra [% caña]	13	Cal [Kg/t caña]	2,56	Pza miel final [%]	42,5
Pureza [% caña]	83	Cachaza [% caña]	4,50	Pza Azúcar [%]	99,7
Pol [% caña]	13,5	Pol [ % cachaza]	2,50	Efic. Fermentación [%]	80
ARD [% caña]	0,7	Agua filtro [% cachaza]	5,50	Efic. Destilación [%]	99
Fibra [% bagazo]	48	Bagacillo [kg/t]	0,70		
Pol [% bagazo]	2,5				
Imbibición [% fibra]	200				

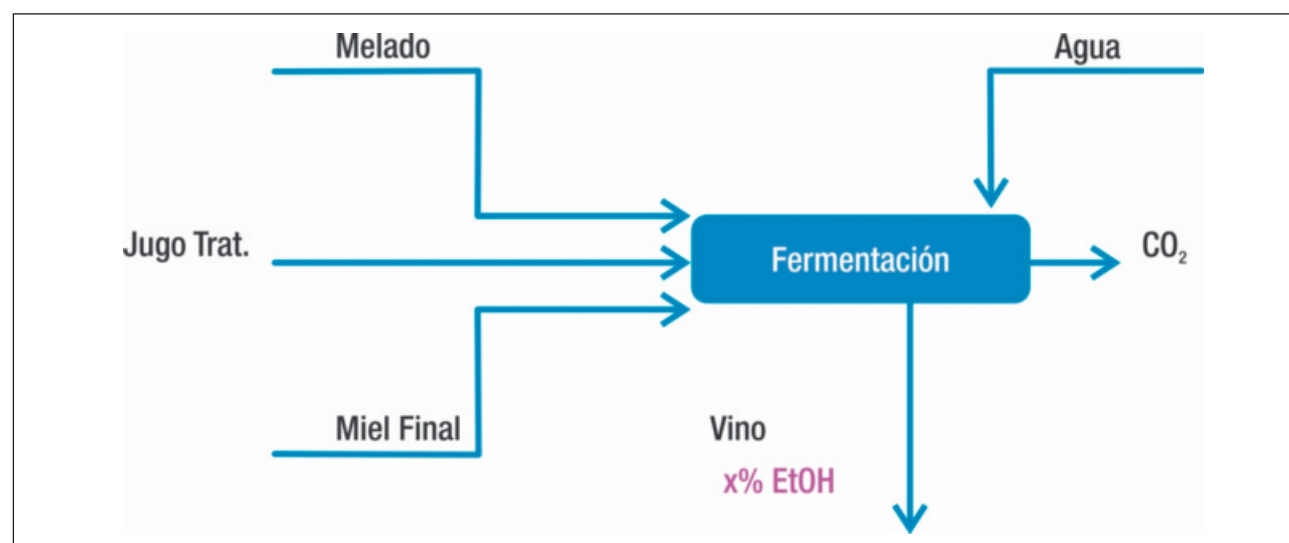


Figura 1. Corrientes intervinientes en el sector de fermentación.

vinaza (celda objetivo), sujeto a restricciones tales como: lograr la producción de etanol propuesta, alcanzar el máximo nivel de alcohol en vino (expresado en por ciento volumen) y, en lo posible, evitar el agregado de agua de dilución al mosto.

La mezcla óptima de las corrientes antes mencionadas debería entonces lograr:

- Máxima concentración de sólidos y baja pureza en la miel final.
- Contenido ajustado de azúcares reductores totales (ART) necesarios para la producción de alcohol buscada.
- Dilución del mosto ajustada al máximo nivel posible de alcohol en vino (expresada en por ciento volumen).
- Ajustar las proporciones de jugo tratado y melado, evitando agregar agua a la mezcla.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La Figura 2 esquematiza los resultados de los balances de materia correspondiente al caso A, donde se estudió el sistema maximizando la producción de azúcar. Cada flujo cuenta con los resultados de los balances de sólidos totales, sacarosa, no azúcares y azúcares reductores directos (ARD).

Para analizar el consumo de vapor se planteó, para

cada caso, un esquema de las demandas de cada estación. Aquí se muestra el caso A (Figura 3), donde se expone cada sector junto con el consumo total, el bagazo disponible y excedente.

Dado que el objetivo del presente trabajo es realizar un análisis comparativo, se consideró que el tiempo aprovechado fue del 100% y se despreciaron las pérdidas indeterminadas, dando como resultado valores de producción ligeramente superiores a los que habitualmente se presentan en fábrica.

Idéntico tratamiento fue realizado sobre el resto de los escenarios productivos y los resultados son expuestos en la Tabla 3, que muestra las principales variables operativas: azúcar (en t/h), etanol anhidro (en m<sup>3</sup>/h), vinaza(en t/h), consumo de vapor sin concentración de vinaza y con concentración de vinaza hasta 35°Brix (ambos en por ciento caña), bagazo excedente(en t/h) y gas natural adicional(en Nm<sup>3</sup>/h).

El análisis comparativo entre los escenarios A, máxima producción de azúcar; y B, conversión total azúcares en alcohol, mostró que cuando no se considera la concentración del total de la vinaza generada, la sola producción de alcohol (caso B) insume un 43,30% caña de vapor. Valor sustancialmente menor al 48,60% caña de vapor necesario para fabricar los 68,16 t/h de azúcar blanco directo y 8,36 m<sup>3</sup>/h de etanol anhidro. Estos resultados son coherentes con numerosos trabajos que

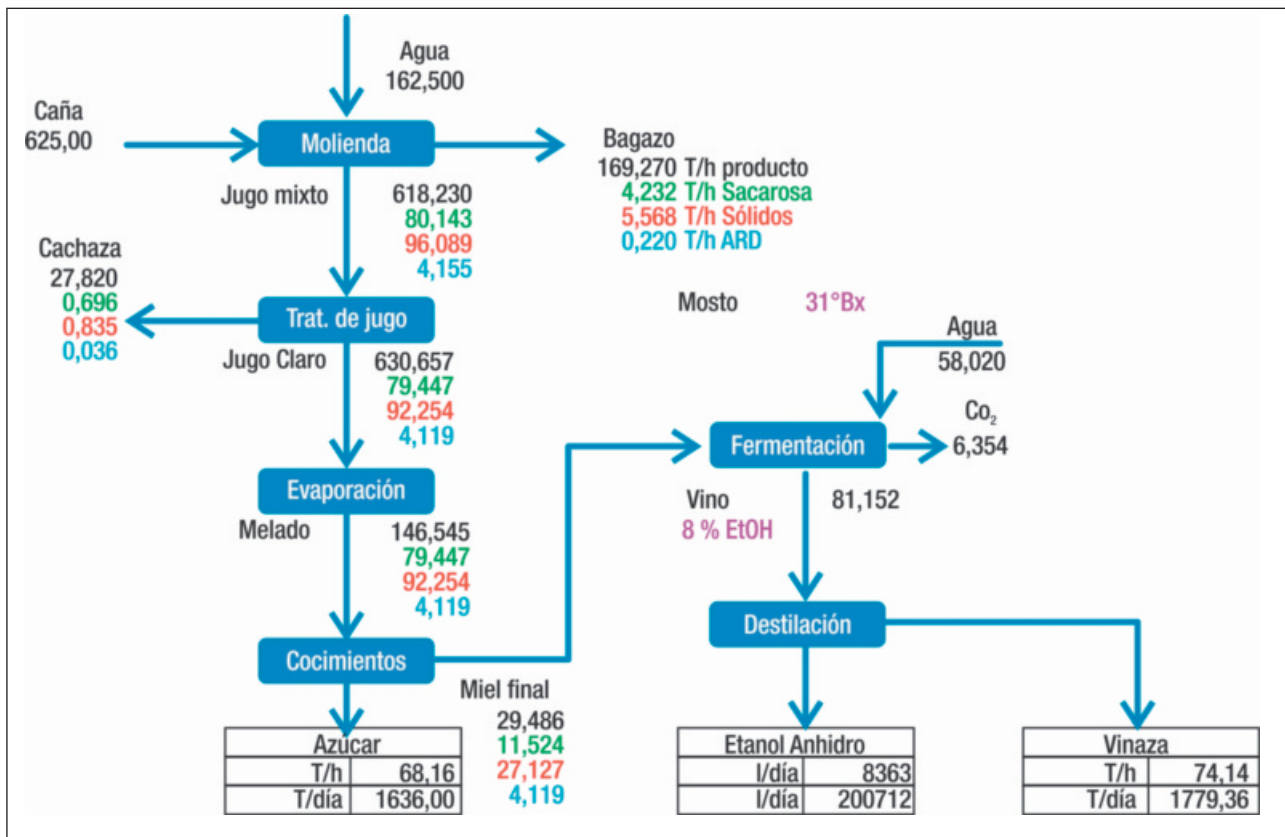


Figura 2. Esquema productivo de máxima producción de azúcar (escenario A) con resultados del balance de masa.

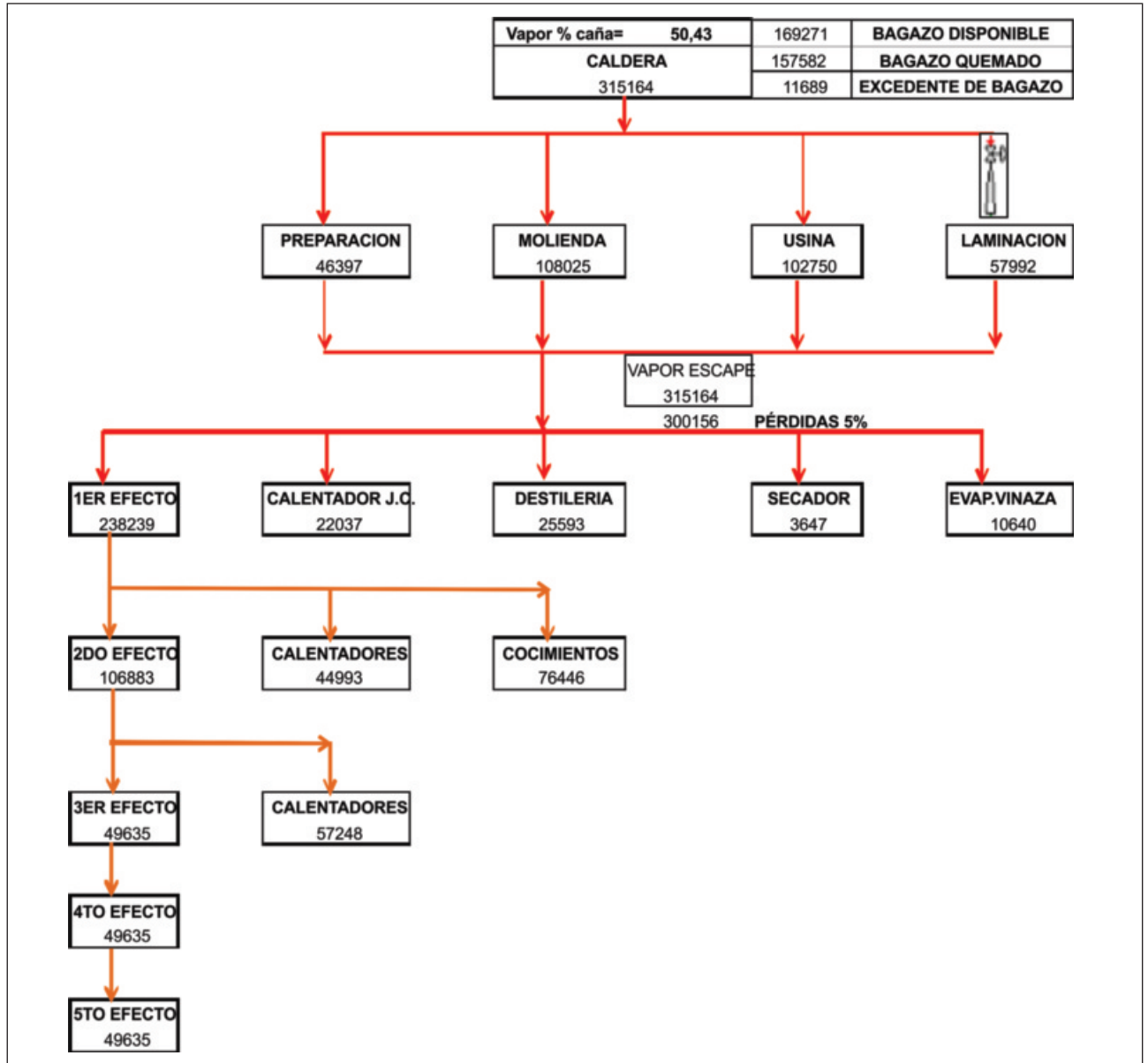


Figura 3. Esquema productivo de máxima producción de azúcar (escenario A) con indicación de los consumos de vapor y bagazo excedente.

Tabla 3. Resultados obtenidos para las opciones analizadas.

Escenario	Azúcar	Etanol anhidro	Vinaza		Consumo vapor [% caña]		Bagazo Excedente	Gas adicional
	[t/h]	[l/h]	[t/h]	Brix [%]	Sin conc. de Vza	Con conc. Vza 35°Bx	[t/h]	[Nm <sup>3</sup> /h]
A	68,16	8,36	74,14	15,35	48,60	50,43	11,69	
B	0,00	45,16	404,12	2,00	43,30	61,82		107,60
C	47,71	19,40	175,81	5,91	43,80	50,70	10,85	
D	47,74	19,39	175,70	5,80	48,60	55,55		19,50
E	13,63	37,50	347,75	2,36	41,60	57,37		45,00

indican la mejora energética al pasar de producir azúcar a una producción mixta de azúcar y alcohol.

Sin embargo, si se considera el consumo de vapor para la concentración de la vinaza, la elevada dilución en la que se incurre al fermentar mostos de jugo claro (como en el caso B) lleva a obtener una vinaza en extremo diluida, la cual puede presentar valores menores de 2°Bx, siendo entonces evidente el impacto de este factor sobre el consumo de vapor. Ahora, el balance global indica que el vapor necesario es de 61,82% caña, cuando anteriormente era de 43,30 % caña.

Por último, se resalta que mientras en la máxima elaboración de azúcar (escenario A) hay un bagazo excedente de 11,69 toneladas por hora, en la producción total de alcohol (escenario B), es necesario recurrir al combustible fósil (107,6 Nm<sup>3</sup> de gas por hora).

En los escenarios C y D se plantea una producción intermedia de alcohol, destinado el 35% y 15% del jugo

respectivamente. Para la primera opción, el azúcar fue obtenido mediante un sistema de tres cocimientos, lográndose una melaza de baja pureza (42,5%); mientras que en la segunda opción se trabajó con dos cocimientos, extrayéndose una miel final de 60% de pureza.

Los resultados obtenidos (ver Tabla 3) indican al sistema de tres cocimientos como el de menor requerimiento de vapor. Considerando que la cantidad y concentración de la vinaza a evaporar son similares en ambos casos, la diferencia en el consumo se explica en que al tener como objetivo igual producción de alcohol, a la opción C debe agregarse más azúcar al proceso de fermentación, lo que queda explicitado en los diferentes porcentajes de jugo tratado a destilería (30% para el escenario C y 15% para el escenario D), dando como resultado un mosto de mayor Brix para el caso C que el D y por consiguiente, un Brix mayor en la vinaza.

El escenario E se presenta como testigo, mostrando

DATOS					
MOLIENDA	TCH	TCD			
	625	15000			
TRATAMIENTO JUGO	SO <sub>2</sub> [ppm]	Cal [kg/t caña]	Bagacillo [kg/t caña]	Agua Filtro [%]	
	600	2,5	0,8	5,5	
PROCESO	ARD	Brix	Pureza		
JUGO A DESTILERIA	0,653	15,11	83,40		
MELADO	4,437	65,00	83,40		
MIEL FINAL	13,960	92,00	42,50		
Conc. Alcohol en vino [%]	Estimar la Producción de Alcohol [m <sup>3</sup> /h]				
8	25				
RESULTADOS					
	Agua	Jugo a Dest	Melado	Miel final	Vinaza
Flujo másico [t/h]	0	242,24	9,28	16,93	291,62
Brix [%]		15,11	65,00	92,00	3,41
Alcohol en Vino [%]	8,00				
JUGO A DESTILERÍA [%]	38		litros de Vinaza/l alcohol		
MELADO A DESTILERÍA [%]	10		11,66		
PRODUCCIÓN CALCULADA					
	AZÚCAR [t /h]	ALCOHOL [m <sup>3</sup> /h]			
	37167	25,00			
	RENDIMIENTO [%]				
	5,95				

Figura 4. Vista de las áreas de ingreso de datos y emisión de resultados respectivamente del sistema de cálculo y optimización de la mezcla a fermentar. Resultados del escenario E optimizado.

la factibilidad de agregar melado al caldo a fermentar cuando crece la producción de alcohol, siendo el consumo lineal en función de la producción y asegurando que el ingreso de melado como materia prima a fermentar no distorsiona la tendencia del consumo, por tratarse de una corriente con una pureza similar a la del jugo claro pero con un menor contenido de agua.

La Figura 4 ilustra a modo de ejemplo las áreas de ingreso de datos y emisión de resultados de la planilla Excel antes descripta. Los valores reflejados en ella corresponden a la optimización de la mezcla propuesta por el escenario E, y una producción de 25 m<sup>3</sup>/h de alcohol.

### CONCLUSIONES

La optimización energética en la producción simultánea de azúcar y alcohol, considerando la concentración de la vinaza generada, es factible si se resuelve la composición del mosto a fermentar. Esto implica trabajar con mieles finales muy bien agotadas (baja pureza) y con alta concentración de sólidos. Además, los azúcares faltantes para producir el alcohol estipulado deben ser aportados por corrientes tales que minimicen la dilución del costo, a fin de lograr la máxima concentración de vino (% volumen).

A través de herramientas disponibles en Excel se generó una estructura de cálculo y optimización que, a través de la comparación de los diferentes resultados, simplifica la toma de decisiones.

El análisis expuesto en este trabajo corresponde

a destilerías que trabajan con vapor de escape, por lo que está pendiente la ampliación del estudio para el caso de destilerías al vacío, donde el uso de vapor vegetal para alimentar la columna modifica el esquema de uso del vapor.

### BIBLIOGRAFÍA CITADA

**Ministerio de Agroindustria de la Nación. 2017.** Informe sectorial n° 80.

**Cortez, L.; P. Magalhães e J. Happi. 1992.** Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. Rev. Bras. de Energ. 2: 111–146.

**Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). 2003.** CALCO 1.0. Manual del usuario. Versión 1.0. [CD ROM]. EEAOC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina.

**Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). 2005.** SIMCE 3.0. Manual del usuario. Versión 3.0. [CD ROM]. EEAOC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina.

**Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). 2010.** SICOVIN 1.0.

**Diez, O. A.; M. C. Cruz y G. J. Cárdenas. 2011.** Optimización energética para la producción simultánea de azúcar y alcohol, en Tucumán, R. Argentina. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 88 (2): 27-40.

**Díaz, G. F.; G. De Boeck; M. C. Cruz y D. Paz. 2013.** SICOVIN V.1.0: “software” para el análisis de concentración de vinaza. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 90 (2): 39-47.