

Usos de agua en la industria sucroenergética de Tucumán, R. Argentina

Romina A. Salazar*; C. Augusto Gómez*; Enrique A. Feijóo*;
Mónica Coronel*; R. Marcelo Ruiz* y Dora Paz*

RESUMEN

El balance hídrico industrial es una excelente herramienta para iniciar el proceso de mejorar el uso y reúso del agua dentro de la fábrica, ya que permite diagnosticar la situación actual de la industria y detectar los puntos donde intervenir más rápidamente para obtener una reducción en la captación de agua de fuentes externas a la fábrica. Para su implementación es necesario conocer el diagrama productivo de la fábrica en estudio y disponer de relevamientos de los circuitos de agua y efluentes. En este trabajo se desarrolló una planilla de cálculo que permitió determinar los usos de agua de cada sector del proceso fabril azucarero a través del empleo de balances de materia y energía. Como resultado se obtuvo un uso total de agua fresca ingresada o captada en el procesamiento de un ingenio azucarero de la provincia de 17,504 m³/t caña (cabe destacar que este valor no es el consumo de la fábrica) y fueron detectados, además, aquellos puntos donde se producen los mayores usos, tales como condensadores barométricos de los sectores de evaporación y cocimientos, enfriamiento de cubas de fermentación y enfriamiento de condensadores de destilería. El resultado obtenido en la captación de agua fresca refleja que la fábrica en estudio no utilizó el recurso hídrico de manera eficiente. La herramienta mencionada facilitó, además, la aplicación de metodologías de recuperación y reutilización del agua que permitieron conducir a minimizar los caudales de captación de agua fresca hoy existentes (el caso que consideró un 57,1% de índice de reúso de flujos provenientes de los condensadores barométricos de los sectores de evaporación y cocimiento y los del enfriamiento de los condensadores del sector de destilación, condujo a reducir la captación de agua desde 16,804 a 6,804 m³/t caña). El esquema azucarero considerado fue planteado por etapas, incluyendo la obtención de etanol y la producción de energía eléctrica para venta a la red (cogeneración).

Palabras clave: balance hídrico, reúso, relevamiento.

ABSTRACT

Water uses in sugarcane industry in Tucumán, R. Argentina

Industrial water balance is an excellent tool to start the process of improving the use and reuse of water within the factory, since it allows diagnosing the current situation of the industry and detecting the points where to intervene more quickly to obtain a reduction in the catchment of water from sources outside the factory. For its implementation it is necessary to know the production diagram of the factory under study and to have surveys of the water and effluent circuits. In this work, a spreadsheet was developed that made it possible to determine the water uses of each sector of the sugar manufacturing process through the use of material and energy balances. As a result, a total use of fresh water entered or captured in the processing of a sugar mill in the province of 17.504 m³/t cane was obtained (it should be noted that this value is not the water factory consumption) and those points where the highest consumption uses were detected (barometric condensers of the sectors of evaporation and crystallization, cooling of fermentation tanks and cooling of distillery condensers). The result obtained in the collection of fresh water reflects that the factory under study did not use the water resource efficiently. This tool also allowed the application of water recovery and reuse methodologies that allowed us to minimize the consumption of fresh water catchment flows that exist today (the case that considered a 57.1% reuse index of flows from the barometric condensers of the evaporation and cooking sectors and those of the cooling of the condensers of the distillation sector, led to a reduction of water uptake from 16.804 to 6.804 m³/t cane). The sugar scheme considered was proposed in stages, including obtaining ethanol and producing electricity for sale to the grid (cogeneration).

Key words: water balance, reuse, survey.

Fecha de recepción: 04/10/2019 - Fecha de aceptación: 05/01/2021

INTRODUCCIÓN

El agua se utiliza en la mayoría de las industrias de procesos para una amplia gama de aplicaciones. Los procesos y sistemas industriales que la utilizan suelen estar sujetos a regulaciones ambientales cada vez más estrictas relacionadas a la descarga de efluentes. Existe una creciente demanda de agua dulce, lo que la hace muy valiosa cada vez en más países, e incluso en algunas partes del mundo constituye un bien fundamental. Los cambios y el ritmo de estos cambios han aumentado la necesidad de mejorar la gestión del uso del agua y la minimización de las aguas residuales. La adopción de técnicas de minimización de uso de ese elemento puede reducir eficazmente la demanda de agua dulce en procesos que utilizan agua y posteriormente reducir la cantidad de efluente generado. Esto puede resultar en la reducción del costo incurrido en la adquisición de agua dulce y el costo del tratamiento de las corrientes de efluentes (Klemeš, 2012).

El consumo de agua podría ser minimizado utilizando estrategias que incluyan cambios en el proceso, reúso si los contaminantes existentes no afectan el proceso, regeneración y reciclaje, cuando los contaminantes del efluente son parcialmente eliminados y el efluente líquido es devuelto al mismo proceso (Zbontar Zver and Glavic, 2005).

En la industria azucarera el agua necesaria en el proceso de fabricación puede provenir de dos fuentes: el agua contenida en la caña de azúcar y que se recupera en los procesos de evaporación; y el agua de cursos y pozos naturales que se consume principalmente en los condensadores barométricos, en el lavado de humos, como agua de refrigeración para las turbinas y máquinas, etc.

La filosofía de efluente cero plantea el reúso o reciclaje de agua de manera de reducir lo más posible la cantidad de agua fresca alimentada al proceso de fabricación (vinculado esto también al uso eficiente del recurso). Esto contribuye a un ahorro económico importante y a la conservación de los recursos naturales, en particular, en los lugares donde la zafra se realiza en épocas de sequía (González Cortés *et al.*, 2015).

Debido a que la caña consiste en aproximadamente 70% de agua, una fábrica de azúcar procesa más agua que azúcar. Toda el agua que ingresa a una fábrica de azúcar también deberá abandonarla en una u otra forma.

Teóricamente existe un excedente de agua producida en una fábrica de azúcar que inevitablemente deberá encontrar su salida de la fábrica en una corriente de efluente. Adicional al agua que ingresa a la fábrica con la caña, también puede haber agua agregada en forma de agua de servicios o cruda (González Cortés *et al.*, 2015).

La reutilización de agua en la industria sucroenergética irá cobrando cada vez más importancia, ya que en un futuro próximo el agua podría comenzar a tener valor económico, por lo que la reutilización del agua se convertirá en una necesidad para mantener la competitividad empresarial, sobre todo en la industria azucarera, donde los consumos del elemento son elevados. El reúso del agua conlleva un ahorro de costos, contribuye a la sostenibilidad de la empresa, y mejora la imagen medioambiental, dado que la reutilización reduce la huella hídrica y va en busca del reto del efluente cero.

Por todo esto, la reutilización del agua en las empresas del sector azucarero es una opción que cada día

cuenta con mayor demanda.

En el presente trabajo se desarrolló una planilla de cálculo que, por medio de ecuaciones de balance de masa y energía, permitió determinar los usos de agua de cada sector del proceso fabril azucarero, detectando principalmente aquellos puntos donde se producen los mayores usos de agua. Esta herramienta permitirá además la aplicación de metodologías de recuperación y reutilización que puedan conducir a minimizar los caudales de captación de agua fresca hoy existentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se implementó la metodología propuesta en el Manual de conservación y reúso de agua en la industria sucroenergética, elaborado por la Agencia Nacional de Agua del Ministerio de Medio Ambiente de Brasil (ANA, 2009). En él se plantean los cálculos para determinar los usos de agua de un ingenio azucarero con destilería anexa, donde el 50% de la caña es destinada a la elaboración de azúcar y el 50% restante a la producción de etanol. Cabe destacar que el uso medio de agua total no varía mucho con respecto al tipo de ingenio (con destilería anexa ó fabricación de azúcar) o al "mix" de producción (cuánto de la caña molida se destina a elaboración de azúcar y etanol), debido a que los usos no comunes en la producción de azúcar y alcohol se compensan en términos de volúmenes.

La metodología utilizada para determinar los usos de agua en el proceso fabril se basa en la aplicación de balances hídricos globales (planteo y resolución de los respectivos balances de materia y energía) con el posterior cálculo de tasas de uso de agua en cada sector productivo (representadas por las siglas Tx), esto es, la cantidad de agua en metros cúbicos por tonelada de caña procesada [m^3/t caña]. Los datos empleados para tal fin corresponden a los obtenidos del relevamiento de datos técnicos y de producción de la fábrica sometida a este estudio. Cabe aclarar que no se solicitaron mediciones al Laboratorio de Mediciones Industriales (LEMI) de la EEAOC debido a que este estudio constituye una primera aproximación de carácter teórica, la cual permitirá definir, en una etapa posterior, los puntos donde se deberán realizar mediciones para obtener un mejor contraste con los valores calculados mediante el balance hídrico industrial.

Los cálculos mencionados fueron realizados empleando una planilla de cálculo Excel, con una hoja por cada etapa del proceso considerado, y una hoja final que posee el resumen de los resultados alcanzados en cada etapa.

El esquema de procesamiento utilizado fue planteado por etapas: recepción, preparación de caña y extracción de jugo; tratamiento de jugo; fabricación de azúcar; fermentación; destilación de etanol y producción de energía, según se muestra en la Figura 1.

Para desarrollar los balances de masa y de energía en los que se basa la metodología propuesta fue necesario conocer el proceso (a través de diagramas de flujos y visitas a fábrica) y disponer de relevamientos de los circuitos de agua y efluentes. Dicha información fue recopilada durante la zafra del año 2015 de un ingenio de la provincia de Tucumán.

Por otro lado, también fue necesario disponer de

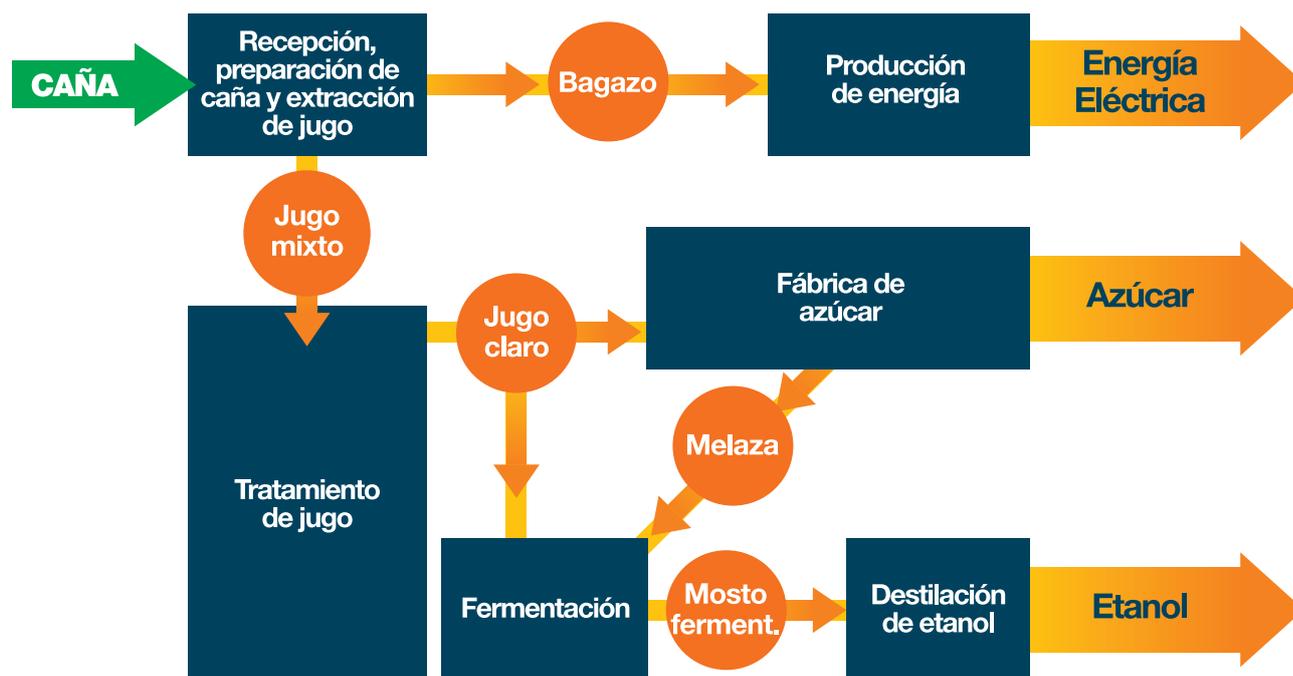


Figura 1. Diagrama simplificado que ilustra las transformaciones que sufren la caña y sus derivados en el proceso azucarero. Dicho diagrama está planteado por etapas en ANA (2009).

los parámetros operativos característicos de modo de poder establecer una línea de base. La Tabla 1 muestra los valores de dichos parámetros para un ingenio de la provincia de Tucumán que procesa 10.000 toneladas de caña por día (TCD).

El procedimiento propuesto por ANA (2009) considera, además, los consumos de vapor como uso del agua, incluido el uso de esta para la producción de energía eléctrica excedente (cogeneración), pero los mismos no son adicionados en el cálculo del uso total de agua realizado en este trabajo. Los usos relacionados al agua de limpieza de pisos y equipamientos fueron abordados por separado.

Los vapores empleados en la evaporación múltiple efecto y en el sector de los cocimientos son considerados también como usos de agua, pero no fueron adicionados en el cálculo del uso total de agua de la fábrica.

A continuación se detallan cada uno de los usos de agua que enuncia ANA (2009) para los diferentes sectores del procesamiento de la caña de azúcar y se indican los valores promedio de uso obtenidos por el mencionado autor.

Sector de recepción, preparación de caña y extracción de jugo: en esta etapa se enuncian tres usos de agua.

- Agua para lavado de caña (2,200 m³/t caña).
- Agua para imbibición de los molinos (0,250 m³/t caña).
- Agua para el enfriamiento de equipos (refrigeración de cojinetes de molinos y del aceite de los equipos de preparación y extracción) (0,165 m³/t caña).

En los cálculos realizados en este trabajo no se tuvo en cuenta el uso del agua de lavado de caña debido a que en el manual se emplea un valor promedio obtenido de los relevamientos realizados en las últimas décadas en

Tabla 1. Parámetros operativos característicos necesarios para establecer la línea de base del ingenio analizado.

Datos		
Imbibición		
Parámetros tecnológicos de caña, bagazo y jugo		
Brix _{caña} =	17	[%]
Brix _{bagazo} =	5	[%]
Brix _{jugo mixto} =	16	[%]
Fibra _{caña} =	15	[%]
Fibra _{bagazo} =	50	[%]
Encalado		
Concentración lechada de cal =	5	[%]
Floculante		
Concentración floculante =	3	[ppm]
Evaporación		
Tenor de azúcar en jugo claro =	15	[°Bx]
Tenor de azúcar en jarabe o melado =	65-70	[°Bx]
Cocimiento		
Tenor de azúcar del jarabe =	65-70	[°Bx]
Tenor de azúcar en la masa final =	100	[°Bx]
Fermentación		
ART _{miel} =	51-57	[%m/m]
ART _{mosto} =	21	[%m/m]
Tx _{miel} =	67	[kg/t caña para azúcar]
Tx _{mosto} =	1000	[kg mosto/t caña]
P _{etanol} = Productividad media de etanol =	85	[L etanol/t caña]
Tenor alcohólico vino centrif. =	8,5	°GL
Destilación		
Consumo de vapor para producir:		
Etanol hidratado =	3,5	[kg vapor/L etanol]
Etanol anhidro =	5,0	[kg vapor/L etanol]
Producción de energía		
Producción de vapor promedio =	500	[kg/t caña]
Agua para otros usos		
Agua para limpieza de pisos y equipamientos	50	[L/t caña]
Agua para uso doméstico (potable)	70	[L/empleadodía]

Brasil y en la actualidad las fábricas azucareras de la provincia de Tucumán dicha operación no utiliza agua.

Sector de tratamiento de jugo: en esta etapa se tienen cinco usos de agua.

- Agua de enfriamiento en el proceso de sulfitación de jugo (0,050 m³/t caña).
- Agua para preparar la lechada de cal (0,030 m³/t caña).
- Agua para preparación del polímero (0,008 m³/t caña).
- Agua para calentamiento de jugo (0,105 m³/t caña). Se recupera el calor del jugo para el mosto.
- Agua para lavado de la torta (0,130 m³/t caña).
- Agua de los condensadores barométricos de los filtros rotativos que funcionan con vacío (0,350 m³/t caña).

Sector de fabricación de azúcar: en esta etapa se tienen cinco usos de agua.

- Agua para el condensador barométrico de la evaporación de jugo (2,250 m³/t caña): por tratarse de uno de los mayores consumos del proceso se muestra a continuación cómo se realiza el cálculo de este uso específico mediante las ecuaciones 1, 2 y 3.

La ecuación 1 es utilizada para calcular la cantidad de agua necesaria para condensar el vapor, a partir de la temperatura del agua de enfriamiento utilizada (30°C) y la variación de temperatura de aproximación de la con-

densación adoptada en condiciones normales de funcionamiento (10°C).

- Agua para el condensador barométrico del cocimiento (5,750 m³/t caña): también se trata de uno de los mayores usos de agua en el proceso. La determinación de este se realiza por medio de las ecuaciones 4 y 5.
- Agua para retardar el cocimiento (0,030 m³/t caña).
- Agua para dilución de mieles y magmas (0,010 m³/t caña).
- Agua para el lavado de azúcar en las centrífugas (0,015 m³/t caña).

Sector de fermentación: en esta etapa se tienen cinco usos de agua.

- Agua para preparación del mosto (0,100 m³/t caña).
- Agua de enfriamiento del jugo para fermentación (1,250 m³/t caña).
- Agua para dilución del fermento (o para preparación de pie de cuba) (0,001 m³/t caña).
- Agua de refrigeración de las cubas de fermentación (3,000 m³/t caña): por tratarse de uno de los mayores usos del proceso se muestra a continuación cómo se realiza el cálculo de este uso específico mediante el uso de balances de energía y dividiendo ambos miembros por el volumen de etanol producido (ecuaciones 6 y 7). Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación 8, que permite el cálculo de la tasa de agua empleada en el enfriamiento de cubas.

$$m_{\text{aguafría-evap}} = m_{\text{evap-evap}} * \left(\frac{Hv - Cp_{\text{agua-s}} * Ta_{\text{salida}}}{Cp_{\text{agua-s}} * Ta_{\text{salida}} - Cp_{\text{agua-e}} * Ta_{\text{entrada}}} \right) =$$

$$= m_{\text{evap-evap}} * \left(\frac{Hv - Cp_{\text{agua}} * Ta_{\text{salida}}}{Cp_{\text{agua}} * (Ta_{\text{salida}} - Ta_{\text{entrada}})} \right) \quad \leftarrow \text{Ecuación 1}$$

$$\Rightarrow M_{\text{agua-evap}} = \frac{m_{\text{aguafría-evap}}}{m_{\text{evap-evap}}} \quad \leftarrow \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$m_{\text{aguafría-evap}}$ = masa de agua fría necesaria para condensar el vapor del sistema de evaporación [kg/t caña].

$m_{\text{evap-evap}}$ = masa total de agua evaporada del jugo en el sistema de evaporación [kg/t caña].

$Cp_{\text{agua-e}} = Cp_{\text{agua-s}}$ = calor específico del agua [kcal/kg°C].

Ta_{entrada} = temperatura de agua a la entrada del condensador [°C].

Ta_{salida} = temperatura de agua a la salida del condensador [°C].

$Ta_{\text{salida}} = T_{\text{vapor}} - \Delta T_{\text{aproximación}}$

T_{vapor} = temperatura del vapor a ser condensado [°C].

$\Delta T_{\text{aproximación}}$ = variación de temperatura de aproximación de la condensación [°C].

Hv = entalpía del vapor a ser condensado [kcal/kg], estimada por la ecuación 3:

$$Hv = 607 + 0,3 * T_{\text{vapor}} \quad \leftarrow \text{Ecuación 3}$$

$M_{\text{agua-evap}}$ = masa de agua fría necesaria para condensar el vapor del sistema de evaporación / masa total de agua evaporada del jugo en el sistema de evaporación = tasa de agua empleada por el condensador barométrico del sistema de evaporación [Kg/Kg]. Se determina a partir de la ecuación 2.

$$m_{\text{aguafría-coc}} = m_{\text{evap-coc}} * \left(\frac{Hv - Cp_{\text{agua-s}} * Ta_{\text{salida}}}{Cp_{\text{agua-s}} * Ta_{\text{salida}} - Cp_{\text{agua-e}} * Ta_{\text{entrada}}} \right) =$$

$$= m_{\text{evap-coc}} * \left(\frac{Hv - Cp_{\text{agua}} * Ta_{\text{salida}}}{Cp_{\text{agua}} * (Ta_{\text{salida}} - Ta_{\text{entrada}})} \right)$$

Ecuación 4

$$\Rightarrow M_{\text{agua-coc}} = \frac{m_{\text{aguafría-coc}}}{m_{\text{evap-coc}}}$$

Ecuación 5

Donde:

$m_{\text{aguafría-coc}}$ = masa de agua fría necesaria para condensar el vapor del sistema de cocimientos [kg/t caña].

$m_{\text{evap-coc}}$ = masa total de agua evaporada en el sistema de cocimientos [kg/t caña].

$Cp_{\text{agua-e}} = Cp_{\text{agua-s}}$ = calor específico del agua [kcal/kg°C].

Ta_{entrada} = temperatura de agua a la entrada del condensador [°C].

Ta_{salida} = temperatura de agua a la salida del condensador [°C].

$Ta_{\text{salida}} = T_{\text{vapor}} - \Delta T_{\text{aproximación}}$

T_{vapor} = temperatura del vapor a ser condensado [°C].

$\Delta T_{\text{aproximación}}$ = temperatura de salida del agua condensada expresada respecto a la del vapor saturado [°C].

Hv = entalpía del vapor a ser condensado [kcal/kg], estimada por la ecuación 3.

$M_{\text{agua-coc}}$ = masa de agua fría necesaria para condensar el vapor del sistema de cocimientos/ masa total de agua evaporada en el sistema de cocimientos = tasa de agua empleada por el condensador barométrico del sistema de cocimientos [Kg/Kg]. Se determina a partir de la ecuación 5.

$$C_{\text{fermentación}} * \frac{m_{\text{sacarosa}}}{PM_{\text{sacarosa}}} = m_{\text{agua-ferm}} * Cp_{\text{agua}} * \Delta T_{\text{agua}}$$

$$\Rightarrow m_{\text{agua-ferm}} = \frac{C_{\text{fermentación}} * m_{\text{sacarosa}}}{Cp_{\text{agua}} * \Delta T_{\text{agua}} * PM_{\text{sacarosa}}}$$

Ecuación 6

$$\frac{m_{\text{agua-ferm}}}{V_{\text{etan ol}}} = \frac{C_{\text{fermentación}}}{Cp_{\text{agua}} * \Delta T_{\text{agua}} * PM_{\text{sacarosa}}} * \left(\frac{m_{\text{sacarosa}}}{V_{\text{etan ol}}} \right)$$

Ecuación 7

$$\therefore M_{\text{agua-ferm}} = \frac{C_{\text{fermentación}} * GL_{\text{etan ol hidratado}}}{Cp_{\text{agua}} * \Delta T_{\text{agua}} * PM_{\text{sacarosa}} * R_{\text{fermentación}} * R_{\text{destilación}}}$$

Ecuación 8

Donde:

$C_{\text{fermentación}}$ = cantidad de calor de reacción de transformación de sacarosa en etanol [kcal/mol sacarosa].

m_{sacarosa} = masa de sacarosa en la fermentación [kg/t caña].

m_{agua} = masa de agua de enfriamiento [kg/t caña].

PM_{sacarosa} = peso molecular de la sacarosa $C_{12}H_{22}O_{11}$ = 342 [kg/mol sacarosa].

$V_{\text{etan ol}}$ = volumen de etanol producido [L].

Cp_{agua} = calor específico del agua [kcal/kg°C], valor adoptado: 1 kcal/kg°C.

ΔT_{agua} = diferencia de temperatura del agua de enfriamiento, normalmente en circuito cerrado [°C], valor adoptado: 4°C.

$R_{\text{fermentación}}$ = rendimiento de fermentación [%], valor adoptado: 85%.

$R_{\text{destilación}}$ = rendimiento de destilación [%], valor adoptado: 95%.

$GL_{\text{etan ol hidratado}}$ = tenor alcohólico de etanol hidratado producido [°GL], valor adoptado: 96 °GL.

$M_{\text{agua-ferm}}$ = tasa de agua utilizada para refrigeración de las cubas [L agua/L etanol].

• Agua de lavado de los gases de fermentación (0,015 m³/t caña). Este uso de agua está vinculado a la recuperación del etanol que arrastra el dióxido de carbono durante el proceso de fermentación.

Sector de destilación de etanol: en la destilación el mosto fermentado ingresa en la columna de destilación, donde es calentado con vapor y posteriormente rectificado en otra columna, en la que produce etanol hidratado y, de acuerdo al caso, es deshidratado en una tercera columna para la producción de etanol anhidro. En esta etapa hay generación de vinaza en la columna de destilación y de flegmasa en la columna de rectificación, siendo utilizada una gran cantidad de agua para la condensación del etanol que sale de las columnas en forma de vapor. En esta

etapa se tienen dos usos de agua.

• Agua para enfriamiento de los condensadores de etanol (3,500 m³/t caña). Este uso constituye también uno de los de mayor valor durante el proceso fabril. El mismo fue determinado a partir del balance entálpico (energía) dividiendo ambos miembros por el volumen de etanol producido (V_{etanol}), obteniéndose las ecuaciones 9 y 10.

Cabe destacar que para el etanol anhidro el cálculo se realiza de manera análoga.

• Vapor para destilación (que puede ser recuperado como condensado o incorporado como residuo en la vinaza y la flegmasa de acuerdo al tipo de calentamiento: vapor burbujeante o vapor indirecto) (0,360 m³/t caña).

Considerando : $m_{\text{agua_entrada}} = m_{\text{agua_salida}} = m_{\text{agua}}$

$$\left(\frac{m_{\text{agua}}}{V_{\text{etanol}}}\right) * C_{p_{\text{agua}}} * \Delta T_{\text{agua}} = \left(\begin{aligned} & H_{v_{\text{vap}}} * \left(\frac{m_{\text{vap}}}{V_{\text{etanol}}}\right) + C_{p_{\text{vino}}} * T_{\text{vino}} * \left(\frac{m_{\text{vino}}}{V_{\text{etanol}}}\right) - \\ & C_{p_{\text{flegmasa}}} * T_{\text{flegmasa}} * \left(\frac{m_{\text{flegmasa}}}{V_{\text{etanol}}}\right) - C_{p_{\text{etanol}}} * T_{\text{etanol}} * \left(\frac{m_{\text{etanol}}}{V_{\text{etanol}}}\right) \\ & - C_{p_{\text{vinaza}}} * T_{\text{vinaza}} * \left(\frac{m_{\text{vinaza}}}{V_{\text{etanol}}}\right) \end{aligned} \right) \quad \leftarrow \text{Ecuación 9}$$

por lo tanto :

$$M_{\text{cond.}} = \left(\frac{m_{\text{agua}}}{V_{\text{etanol}}}\right) = \frac{1}{C_{p_{\text{agua}}} * \Delta T_{\text{agua}}} * \left(\begin{aligned} & H_{v_{\text{vap}}} * M_{\text{vap}} + C_{p_{\text{vino}}} * T_{\text{vino}} * M_{\text{vino}} - \\ & C_{p_{\text{flegmasa}}} * T_{\text{flegmasa}} * M_{\text{flegmasa}} - C_{p_{\text{etanol}}} * T_{\text{etanol}} * M_{\text{etanol}} \\ & - C_{p_{\text{vinaza}}} * T_{\text{vinaza}} * M_{\text{vinaza}} \end{aligned} \right) \quad \leftarrow \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- M_{cond.} = tasa de agua para condensadores de etanol [L/L etanol hidratado] o [L/L etanol anhidro].
- V_{etanol} = volumen de etanol producido [L].
- m_{agua} = masa de agua para condensadores [kg/t caña].
- m_{vino} = masa de vino [kg/t caña].
- m_{vap} = masa de vapor en la columna destiladora [kg/t caña].
- m_{vinaza} = masa de vinaza [kg/t caña].
- m_{flegmasa} = masa de flegmasa [kg/t caña].
- m_{etanol} = masa de etanol [kg/t caña].
- d_{vino} = densidad del vino [kg/L], valor adoptado: 1 kg/L.
- d_{flegmasa} = densidad de la flegmasa [kg/L], valor adoptado: 1 kg/L.
- d_{etanol} = densidad del etanol [kg/L], valor adoptado: 0,8 kg/L.
- M_{vap} = uso de vapor en la destilería por volumen de etanol producido [kg vapor/L etanol hidratado] o [kg vapor/L etanol anhidro], valor adoptado: 3,5 kg vapor/L etanol hidratado.
- M_{flegmasa} = masa de flegmasa por volumen de etanol producido [kg flegmasa/L etanol].
- M_{etanol} = masa de etanol por volumen de etanol producido [kg etanol/L etanol].
- M_{vinaza} = masa de vinaza por volumen de etanol producido [kg vinaza/L etanol].
- M_{vino} = masa de vino por volumen de etanol producido [Kg vino/L etanol].
- GL_{vino} = tenor de etanol en el vino (valor que se adopta de 7 a 11 °GL), valor adoptado: 8,5 °GL.
- C_{p_{agua}} = calor específico del agua [kcal/kg°C], valor adoptado: 1 kcal/kg°C.
- C_{p_{vino}} = calor específico del vino [kcal/kg°C], valor adoptado: 0,96 kcal/Kg°C.
- C_{p_{etanol}} = calor específico del etanol [kcal/kg°C], valor adoptado: 0,67 kcal/kg°C.
- C_{p_{vinaza}} = calor específico de la vinaza [kcal/kg°C], valor adoptado: 1 kcal/kg°C.
- C_{p_{flegmasa}} = calor específico de la flegmasa [kcal/kg°C], valor adoptado: 1 Kcal/Kg°C.
- H_{v_{vap}} = entalpía de vapor saturado [kcal/kg], valor adoptado a 124 °C: 647,8 kcal/kg.
- T_{etanol} = temperatura de salida del etanol [°C], valor adoptado: 50°C.
- T_{vino} = temperatura de entrada del vino [°C], valor adoptado: 35°C.
- T_{vinaza} = temperatura de salida de la vinaza [°C], valor adoptado: 100°C.
- T_{flegmasa} = temperatura de salida de la flegmasa [°C], valor adoptado: 100°C.
- ΔT_{agua} = diferencia de temperatura del agua utilizada [°C], valor adoptado: 15°C.

Sector de producción de energía: esta etapa incluye las operaciones de generación de energía, calderas y turbo-generadores. El agua en esta área de generación de energía está dividida en cinco usos.

- Agua para la generación de vapor vivo (fuerza motriz) (0,500 m³/t caña).
- Agua para convertir el vapor recalentado en saturado (empleando un desobrecalentador) (0,015 m³/t caña).
- Agua para el lavado de los gases de combustión de la caldera (1,000 m³/t caña).
- Agua para la limpieza de ceniceros (0,250 m³/t caña).
- Agua para la refrigeración del aire y aceite de los turbo-generadores (0,500 m³/t caña).

El resultado obtenido para cada uno de los usos descriptos anteriormente será presentado en la Tabla 2, en las columnas uso específico y uso medio. El uso específico de agua hace referencia a si el jugo de caña de azúcar ha sido empleado para producir azúcar o alcohol y el uso medio indica el uso de agua con respecto al total de caña procesada por la fábrica en estudio. También se presenta el uso medio expresado como por ciento caña en dicha tabla.

La captación de agua o caudal de agua que la fábrica toma de fuentes o cursos externos y cuyo valor se pretende minimizar mediante el análisis propuesto en este trabajo, se calculó como lo indica la ecuación 11.

Se considera que el término agua de la caña posee un valor fijo de 0,7 [m³/t caña]. Esta ecuación refuerza entonces la idea de que en la medida que se planteen estrategias de reúso de agua, se obtendrán menores valores de captación.

Se consideraron tres casos de consumo y reúso de agua del ingenio azucarero estudiado que se detallan a continuación:

Caso base: ingenio azucarero que no reutiliza los condensados generados.

Caso 1: los flujos provenientes de los condensadores barométricos de los sectores de evaporación y cocimientos en otras partes del proceso.

Caso 2: ingenio azucarero que reutiliza los flujos provenientes de los condensadores barométricos de los sectores de evaporación y cocimientos y los del enfriamiento de los condensadores del sector de destilación en otras partes del proceso.

El llamado índice de reúso resulta del cociente entre el reúso de agua y el uso de agua del proceso, expresándose el mismo como fracción porcentual de este último.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran los resultados de los distintos usos de agua obtenidos para un ingenio de la provincia de Tucumán que procesa 10.000 TCD, en la que las celdas pintadas de color naranja destacan los de mayor uso de agua por sector, correspondientes a los condensadores de los sectores de evaporación y cocimiento, al enfriamiento de cubas en el sector de fermentación y a los condensadores del sector de destilería. Se informan además uso total, subtotaes por sector, el uso específico, el uso medio y en la última columna el porcentaje que representa cada uno de ellos sobre el consumo total de la fábrica. Las celdas sombreadas en gris no fueron contabilizadas en los subtotaes respectivos ya que se consideran sólo usos de agua líquida.

Es importante resaltar aquí que el uso medio o promedio calculado en el presente trabajo no expresa la captación de agua de fuentes externas a la fábrica, ya que el uso que se calculó en cada etapa está definido como el agua que no retorna al cuerpo receptor correspondiente. La decisión de reutilización del agua en las diferentes etapas del proceso estuvo basada en el estado del fluido una vez utilizado.

Como puede observarse en la tabla anterior, el uso total obtenido es 17,504 m³/t caña. Cabe aclarar una vez más que este valor no incluye en su sumatoria el empleo de los vapores, cuyos usos están identificados en las celdas pintadas de color gris indicado en Tabla 2.

En la Tabla 3 se destacan aquellas operaciones que presentan los mayores usos ya descriptos anteriormente. De aquí surge la importancia de instalar equipos de enfriamiento de los condensados (torres de enfriamiento, piletas con aspersores, etc.), que permitirían la reutilización del agua.

En la Tabla 4 se muestra cómo varía la captación de agua, como así también el reúso de agua referido al uso total (17,504 m³/t caña) y en consecuencia el índice de reúso osciló entre 0% para el caso base (donde no se reutilizan los condensados) y 57,1% para el caso 2 (donde se reutilizaron los flujos provenientes de los condensadores barométricos de los sectores de evaporación y cocimiento y los del enfriamiento de los condensadores del sector de destilación).

En la Figura 2 puede observarse el efecto de la aplicación de medidas de reúso de agua, como las de los casos propuestos en el análisis anterior, sobre la tasa promedio de captación de ingenios azucareros de Brasil en las últimas décadas. Tales medidas estuvieron estrechamente vinculadas con los objetivos de minimización de la captación y de efluente cero. En la figura mencionada se puede observar que hacia finales de la década del 2010 el valor de captación alcanzó en ese país un valor de 1 m³/t caña, lo cual se logró al tener un índice de reúso de agua del 91%. Brasil tiene como meta alcanzar en los próximos años un índice de reúso del 95%.

$$\text{Captación [m}^3\text{/t caña]} = \text{uso neto de agua [m}^3\text{/t caña]} - \text{agua en la caña [m}^3\text{/t caña]}$$

Ecuación 11

Donde:

Uso neto de agua [m³/t caña] = uso de agua del proceso [m³/t caña] - reúso de agua [m³/t caña]

Tabla 2. Usos específicos y medios de agua en fábrica de azúcar y alcohol expresados en m³/t caña y en porcentaje respecto del total.

Sector	Finalidad	Uso específico	Uso medio		
			[m³/t caña]	[%]	
Alimentación, preparación y extracción (molindas y difusores)	Imbibición	0,269 m³/t caña total	0,269	1,5	
	Enfriamiento de cojinetes	0,034 m³/t caña total	0,034	0,2	
	Enfriamiento de aceite	0,130 m³/t caña total	0,130	0,7	
Subtotal			0,433	2,5	
Tratamiento de jugo	Enfriamiento de la sulfitación del jugo ^(*)	0,100 m³/t caña para azúcar	0,050	0,3	
	Preparación de lechada de cal	0,030 m³/t caña total	0,030	0,2	
	Preparación de polímero ^(*)	0,018 m³/t caña para azúcar	0,009	0,1	
	Calentamiento de jugo claro	para azúcar ^(*)	157,5 kg vapor /t caña para azúcar	0,079	0,4
		para etanol ^{(*)2 y (*)3}	63 kg vapor /t caña para etanol	0,032	0,2
	Lavado de torta	0,030 m³/t caña total	0,030	0,2	
	Condensadores de filtros	0,300 a 0,350 m³/t caña total	0,350	2,0	
Subtotal			0,469	2,7	
Fábrica de azúcar ^{(*)1}	Vapor para evaporación	0,414 t/t caña para azúcar	0,207	1,2	
	Condensadores barométricos evaporación	4 a 5 m³/t caña total	2,250	12,9	
	Vapor para cocimiento	0,170 t/t caña para azúcar	0,085	0,5	
	Condensadores barométricos cocimiento	4 a 8 m³/t caña total	3,000	17,1	
	Dilución de mieles y magmas	0,050 m³/t caña para azúcar	0,025	0,1	
	Retardo del cocimiento	0,020 m³/t caña para azúcar	0,010	0,1	
	Lavado de azúcar (1/3 de agua ó 2/3 de vapor)	0,030 m³/t caña para azúcar	0,015	0,1	
	Retención de polvo de azúcar	0,040 m³/t caña para azúcar	0,020	0,1	
	Subtotal			5,320	30,4
Fermentación ^{(*)2}	Preparación de mosto	0 a 10 m³/m³ etanol residual	0,100	0,6	
	Enfriamiento de jugo	30 m³/m³ etanol	1,250	7,1	
	Preparación de pie de cuba	0,010 m³/m³ etanol	0,251	1,4	
	Lavado de gases de fermentación CO2	1,5 a 3,6 m³/m³ etanol	0,110	0,6	
	Enfriamiento de cubas	60 a 80 m³/m³ etanol	2,976	17,0	
Subtotal			4,687	26,8	
Destilería ^{(*)2}	Calentamiento (vapor)	3,5 a 5 kg/m³ etanol	0,173	1,0	
	Enfriamiento de condensadores	80 a 143 m³/m³ etanol	4,750	27,1	
Subtotal			4,750	27,1	
Generación de energía	Producción de vapor directo	400 a 600 kg/t caña total	0,500	2,9	
	Desobrecalentamiento	0,030 L/kg vapor	0,015	0,1	
	Lavado de gases de caldera	2,0 m³/t vapor	1,000	5,7	
	Limpieza de ceniceros	0,500 m³/t vapor	0,250	1,4	
	Enfriamiento del aire y aceite de turbogeneradores	15 L/kW	0,500	2,9	
Subtotal			1,765	10,1	
Otros	Limpieza de pisos y equipamientos	0,050 m³/t caña total	0,050	0,3	
	Uso potable	70 L/empleador.día	0,030	0,2	
Subtotal			0,080	0,5	
Total			17,504	100	

Observaciones:

(*)1 ítems que no participan del proceso de producción de etanol;

(*)2 ítems que no participan del proceso de producción de azúcar;

(*)3 se recupera el calor del jugo para el mosto.

Tabla 3. Operaciones que presentan mayores consumos de agua expresados en m³/t caña y en porcentaje respecto del total.

Sector	Finalidad	Uso específico	Uso medio	
			[m³/t caña]	[%]
Fábrica de azúcar	Condensadores barométricos de evaporación	4 a 8 m³/t caña para azúcar	3,000	17,1
Fábrica de azúcar	Condensadores barométricos de cocimiento	4 a 5 m³/t caña para azúcar	2,250	12,9
Fermentación	Refrigeración de las cubas de fermentación	60 a 80 m³/m³ etanol	2,976	17,0
Destilería	Enfriamiento de condensadores	80 a 143 m³/m³ etanol	4,750	27,1

Tabla 4. Variación de la captación de agua en función del índice de reúso.

	Caso Base	Caso 1	Caso 2
Consumo agua en proceso [m ³ /t caña]	17,504	17,504	17,504
Reúso de agua [m ³ /t caña]	0,000	5,250	10,000
Índice de Reúso (%)	0,0%	30,0%	57,1%
Agua de caña [m ³ /t caña]	0,700	0,700	0,700
Captación [m³/t caña]	16,804	11,554	6,804

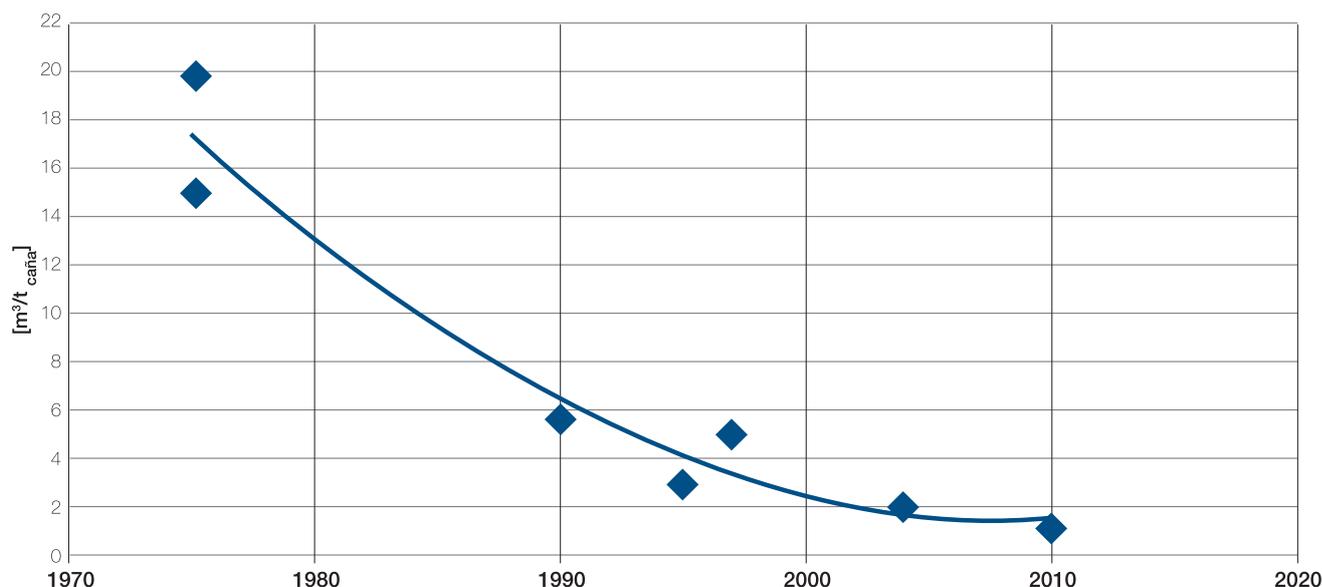


Figura 2. Evolución de la tasa promedio de captación de agua en ingenios de Brasil (ANA, 2009).

CONCLUSIONES

La aplicación de esta metodología a un ingenio de la provincia permitió diagnosticar la situación actual de este y detectar aquellos puntos donde podría intervenir de modo de lograr una reducción en la captación de agua de fuentes o cursos externos.

Quedó demostrado entonces que la captación de agua disminuye al incrementar el reúso de los condensados generados en los sectores de mayor consumo de la fábrica. El índice de reúso obtenido osciló entre el 30,0% (al reutilizar condensados según indica el caso 1) y 57,1% (al reutilizar los condensados según se indica en el caso 2).

Se logró el desarrollo de una metodología de cálculo en una planilla Excel que permitió desarrollar el balance hídrico en un ingenio azucarero, que incluye destilería de alcohol y planta de cogeneración de energía eléctrica para venta a la red pública.

A partir de este trabajo, la EEAOC podrá ofrecer un nuevo servicio a los ingenios azucareros, para el cual habrá que particularizar los circuitos de aguas y efluentes para cada fábrica.

Cabe destacar que para asistir a este servicio, la EEAOC cuenta con un laboratorio de ensayos y mediciones industriales (LEMI) equipado con instrumental portátil

no invasivo que permite las mediciones de caudales por ultrasonido, tanto en tuberías como en canales abiertos.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Agência Nacional de Águas; Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (ANA); União da Indústria da Cana-de-Açúcar; Centro de Tecnologia Canavieira.** – Brasília. 2009. Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética.
- González Cortés, M.; I. Alomá Vicente; R. Espinosa Pedraja y E. González Suárez.** 2015. Tecnologías y sistemas para el manejo de agua y condensados en la producción de azúcar. Revista Centro Azúcar 42, Enero-Marzo, pp. 72-87). [En línea] Disponible en: <http://centrozucar.qf.uclv.edu.cu>. Consultado el 20 de febrero de 2020.
- Klemeš, J.** 2012. Industrial water recycle/reuse, Current Opinion in Chemical Engineering 1 (3): 238-245.
- Zbontar Zver, L. and P. Glavic.** 2005. Water minimization in process Industries: case study in beet sugar plant, Resources, Conservation and Recycling. 43, p.133-145.