

INTEGRACIÓN DE LA RED DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR CRUDO

WATER NETWORK INTEGRATION IN RAW SUGAR PRODUCTION

Junior Lorenzo Llanes^{1}, Orestes Mayo Abad¹, Oscar Jiménez Cabezas²
y Alain Pérez González³*

¹Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 119 #11901 e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao, Habana, Cuba.

²Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, 20 # 4111 e/ 18A y 47, Playa, La Habana, Cuba.

³Universidad de Santiago de Chile, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 3363, Estación Central, Santiago de Chile, Chile.

Recibido: Junio 28, 2016; Revisado: Octubre 12, 2016; Aceptado: Febrero 15, 2017

RESUMEN

Una de las principales industrias de procesos en Cuba es la azucarera. Entre las características de este tipo de industria está la alta demanda de agua en sus procesos. En el presente trabajo se realizó un estudio de integración de agua entre las distintas operaciones del proceso de producción de azúcar crudo con el objetivo de reducir los consumos de agua fresca. Se construyeron las curvas compuestas de las fuentes y las demandas, lo que permitió determinar el requerimiento mínimo de agua de la red ($1587,84 \text{ m}^3/\text{d}$), así como la cantidad de efluente generado ($0,35 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{caña}}$). Los esquemas de distribución de agua fresca así como de reuso de aguas entre las distintas operaciones fueron obtenidos a partir del algoritmo del vecino más cercano. A partir de considerar nuevas restricciones de calidad se logró eliminar el consumo externo de agua, así como reducir la cantidad de efluente en un 37% respecto a las restricciones iniciales.

Palabras clave: integración de agua, curvas compuestas, producción de azúcar

ABSTRACT

One of the main process industries in Cuba is that of the sugarcane. Among the characteristics of this industry is the high demand of water in its processes. In this work a study of water integration was carried out from the different operations of the production process of raw sugar, in order to reduce the fresh water consumption. The compound curves of sources and demands were built, which allowed the determination of the minimum water requirement of the network (1587,84 m³/d), as well as the amount of effluent generated (0,35 m³/t_{cane}). The distribution scheme of fresh water and water reuse among different operations were obtained from the nearest neighbor algorithm. From considering new quality constrains was possible to eliminate the external water consumption, as well as to reduce the amount of effluent in a 37% in relation to the initial constrains.

Keywords: water integration, compound curves, sugar production.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de producción de azúcar de caña es uno de los principales consumidores de agua y productor de aguas residuales (Rein, 2007; Rein et al., 2011; Urbaniec y Klemeš, 2008). En la mayoría de los países productores de azúcar, el tema del manejo del agua en esta industria es un punto crítico (González et al., 2011). Las regulaciones ambientales obligan a la reducción en el consumo de agua y el vertimiento de aguas residuales, forzando a mejorar el manejo del agua, reducir las pérdidas y velar por la operación de los circuitos cerrados y potenciar el reuso de la misma (Pina et al., 2015).

El diseño de redes de agua que potencien su reuso en un mayor número de operaciones constituye una vía para la reducción en los consumos de agua fresca (Lorenzo, 2016). En este sentido una de las herramientas que ha demostrado su fortaleza es la integración de procesos (IP). Dentro de la IP, y como parte de la integración másica, se ha desarrollado la síntesis de redes de agua (usualmente conocida como *water pinch*) (Foo, 2009). Los dos enfoques fundamentales de la IP (Análisis Pinch y la Programación Matemática), han sido aplicados con el objetivo de obtener redes de agua de consumo mínimo. El presente trabajo tiene como objetivo aplicar una estrategia de integración de agua, basada en el análisis pinch, para minimizar el consumo de agua fresca en el proceso de producción de azúcar crudo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Fuentes y demandas de agua en la producción de azúcar crudo

Para analizar el manejo del agua en la fábrica de azúcar crudo, primeramente se determinan los requerimientos de las diferentes etapas del proceso de producción. Para ello como primer paso se determinan las demandas de agua sin considerar circuitos cerrados de acuerdo con otros autores (Chavez-Rodriguez et al., 2013; Mosqueira-Salazar et al., 2013; Pina et al., 2015). En la tabla 1 se muestran las demandas consideradas en el estudio de integración. Los valores de consumos se obtuvieron de la literatura, así como de una fábrica real.

Seguidamente se identifican las diferentes fuentes a ser consideradas en el estudio de integración. Estas fuentes pueden o no ser sometidas a tratamiento en dependencia de los requerimientos de calidad para cada operación. Entre las fuentes identificadas para implementar su reuso se encuentran los condensados de la etapa de concentración. Estas corrientes constituyen fuentes (utilidades) de diferentes calidades según su contaminación. Otras de las fuentes son los condensados de los calentadores, tachos y el agua de salida del lavado de filtros.

Tabla 1. Demandas de agua en el central

<i>Etapa</i>	<i>Uso del agua</i>	<i>Demanda [% peso de caña]</i>
Extracción de jugo	Imbibición ^a	30
Purificación y clarificación	Alcalización ^b	2
	Lavado de filtro ^b	5,5
Concentración	Condensador barométrico	Según condiciones de operación
Cristalización y centrifugación	Lavado de centrífugas ^c	1,5
	Añadida en tachos ^a	5
	Condensador de tachos	Según condiciones de operación
Generación de vapor	Alimentación a caldera	Según condiciones de operación

^aReal en planta

^bRein (2007)

^cChavez-Rodriguez et al.,(2013)

Posterior a los pasos anteriores se calculan los requerimientos reales de la planta. Para ello se tienen en cuenta los circuitos cerrados. En cada uno de dichos circuitos se producen pérdidas, en este trabajo solo se consideraron los circuitos que se muestran en la tabla 2 (Rein, 2007).

Tabla 2. Pérdidas de agua en los circuitos cerrados

<i>Circuito cerrado</i>		<i>% de Pérdidas [en base al agua de inyección]</i>
Enfriadero	Condensador barométrico del múltiple	4
	Condensador barométrico de tachos	

2.2. Integración de agua

En las etapas de diseño y rediseño de redes de agua pueden estar presentes varias operaciones que por su naturaleza dividen los problemas de integración de redes de agua en dos grupos. En el primero de estos están las *operaciones con carga*

contaminante fija. Las operaciones en esta categoría se controlan atendiendo a la calidad del agua (Polley et al., 2000) y se pueden modelar como unidades de transferencia de masa tales como el lavado y la extracción, siendo el agua el único agente de separación (Hallale y Fraser, 1998; Wang y Smith, 1994). La otra categoría agrupa a las *operaciones con flujo fijo*, siendo controladas en este caso atendiendo a la cantidad de agua (Polley et al., 2000), incluyendo varias unidades de uso del agua como generadores de vapor, torres de enfriamiento y otros.

En el caso particular del proceso de producción de azúcar crudo, atendiendo a las clasificaciones anteriores, las operaciones presentes en la red de agua del central pueden clasificarse como se muestra en la figura 1.

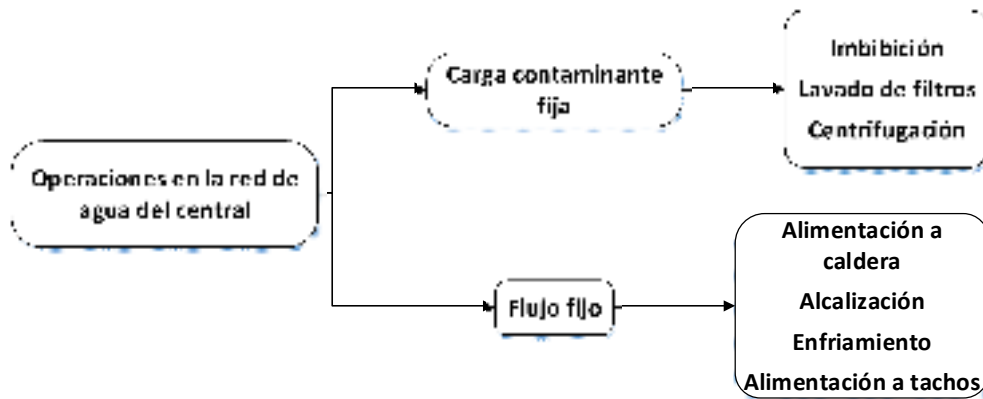


Figura 1. Operaciones de la red de agua del proceso de producción de azúcar crudo

2.3. Estrategia de integración de la red de agua

Para llevar a cabo el rediseño de la red de agua se aplicó una metodología basada en el análisis pinch. Dada la presencia de ambos tipos de operaciones en el proceso productivo (Figura 1), se consideró el problema de tipo híbrido (Prakash y Shenoy, 2005). Para problemas en los que están presentes ambos tipos de operaciones basta con convertir las operaciones a carga contaminante fija en flujo fijo (Foo, 2009; Prakash y Shenoy, 2005). Una vez hecho esto, todas las fuentes y sumideros se agrupan en orden creciente de sus cargas contaminantes sin importar el tipo de unidades a las que pertenecen. Luego se calcula tanto la carga contaminante como el flujo acumulado. Finalmente se grafica la carga contaminante acumulada contra el flujo acumulado para cada grupo de corrientes. Es importante destacar que en cada punto de las curvas debe cumplirse que la carga de las fuentes debe ser menor o igual que la de los sumideros.

En general la estrategia de integración se divide en dos etapas fundamentales, la determinación de los requerimientos mínimos de agua fresca y el rediseño de la red. En la primera de estas se construyen las curvas compuestas de las fuentes y las demandas. Luego se pasa al rediseño, para ello se aplicó el algoritmo del vecino más cercano (NNA) (Prakash y Shenoy, 2005).

En el presente trabajo el contaminante que se tuvo en cuenta para la construcción de las curvas compuestas fue el azúcar disuelto. Los valores empleados se encuentran dentro del intervalo reportado por González et al., (2011), tal como se muestra en la tabla 3. Por otra parte, se tuvieron en cuenta los criterios reportados por Chavez-Rodriguez

(2013) sobre las calidades de las diferentes demandas de agua. En la figura 2 se muestran los pasos de la estrategia de integración.

La estrategia de integración de agua se aplicó en un central con una molida potencial de 10 000 t_{caña}/d, operando con una tasa de molida adecuada igual al 100% de la molida potencial. El área de evaporación está formada por un quintuple efecto, en el cual se realizan extracciones en los tres primeros efectos para el calentamiento en tachos y en el banco de intercambiadores. El calentamiento de jugo alcalizado se realiza en una cascada de intercambiadores de tipo Webre. Parte del vapor de escape de los turbogeneradores se emplea en el calentamiento del jugo claro antes de entrar al múltiple efecto.

Tabla 3. Composiciones de fuentes y demandas

<i>Demandas</i>	<i>Composición</i> [mg _{azúcar} /kg _{agua}]	<i>Fuentes</i>	<i>Composición</i> [mg _{azúcar} /kg _{agua}]
A caldera	0-10	Condensados de evaporadores	0-55
Alcalización	0-15	Condensados de calentadores	33-60
Imbibición	0-80	Condensados de tachos	0-10
Lavado en filtro	0-80	Lavado de filtros	0-80
Lavado de centrifugas	0-80		
Alimentación a tachos	0-80		

El sistema de recuperación de condensados está formado por tres tanques de condensados presurizados. Además, se cuenta con dos tanques de reserva (presión atmosférica) a los cuales se envían los condensados sobrantes según la calidad de estos. En caso de que exista un déficit de agua es necesario suministrar agua desde la planta de tratamiento a uno de los tanques de reserva.

Al primero de los tanques presurizados (TK1) se envían los condensados del primer vaso del múltiple efecto, los cuales son empleados como alimentación a la caldera. Hacia el segundo tanque (TK2) presurizado se envían los condensados del vaso 2 y los de tacho, los cuales se emplean como agua de imbibición. El resto de los condensados del múltiple son enviados al tercer tanque presurizado (TK3). Los condensados del tren de calentamiento se dirigen a los tanques de reserva. Los flujos de las corrientes de condensados fueron obtenidos a partir de la simulación del sistema termoenergético (STE) del central, empleando el simulador de procesos STA v4.1 (Pérez de Alejo y col., 2014).

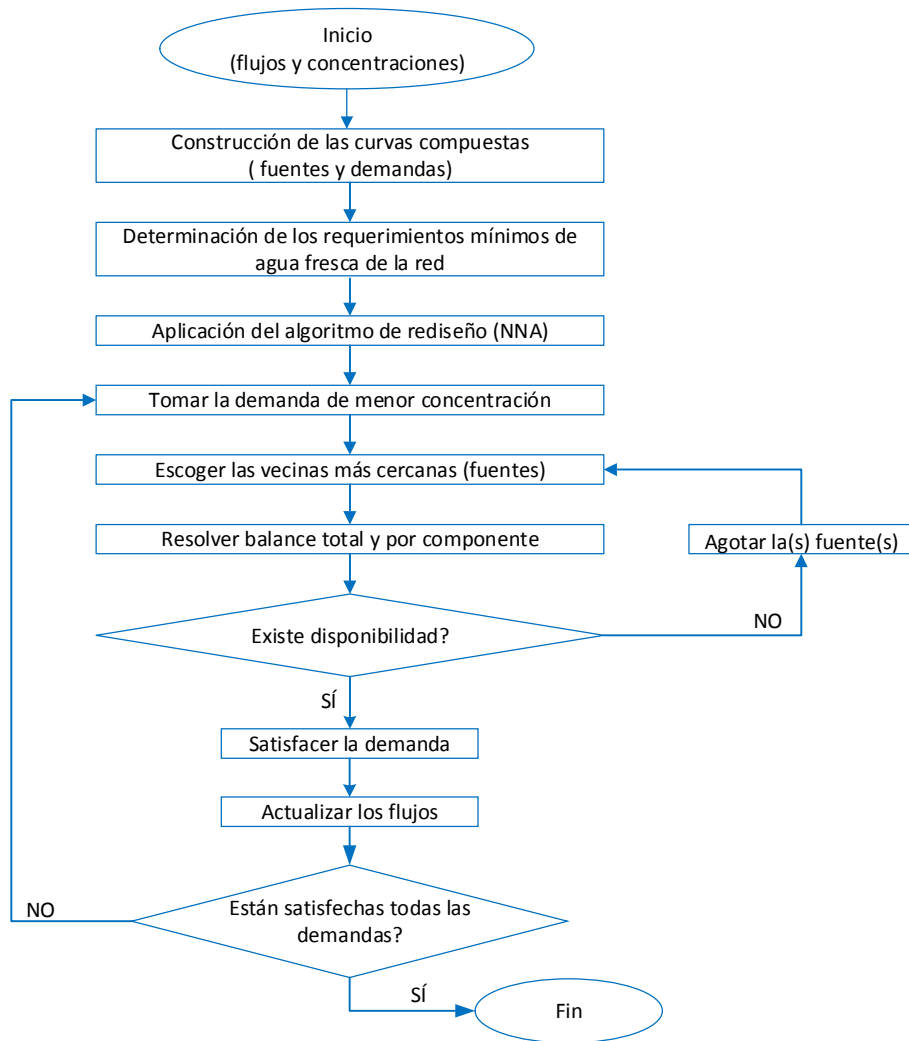


Figura 2. Pasos de la estrategia de integración de la red de agua

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Determinación de los requerimientos mínimos de agua y rediseño de la red

Las curvas compuestas de las fuentes (CCF) y las demandas (CCD) así como las curvas desplazadas se muestran en la figura 3 (izquierda y derecha respectivamente).

De acuerdo a la figura 3, para lograr un desplazamiento de la CCF por debajo de la CCD es necesario incrementar el flujo acumulado, manteniendo constante la carga contaminante. Esto solo se logra incorporando agua fresca. Por tanto el menor desplazamiento para ubicar a la CCF debajo de la CCS constituye el requerimiento mínimo de agua fresca a incorporar. Para el caso de este estudio este valor es de 66,16 t/h (1587,84 m³/d o 158,78 L/t_{caña}). Si se consideran las pérdidas de agua de inyección en los circuitos cerrados (ver tabla 2) la demanda total de agua es de 439,44 L/t_{caña}. Los valores de agua de inyección en los condensadores barométricos se obtuvieron a partir de la simulación del STE en el simulador STAv4.1. El pinch de la red se obtiene a una carga contaminante acumulada de 2,79 kg/h y una concentración de 27 mg_{azúcar}/kg_{agua} (pendiente del segmento que corresponde al condensado del vaso tres

del múltiple efecto), lo que indica que no se debe emplear agua fresca para satisfacer aquellas demandas cuya concentración sea mayor que este valor.

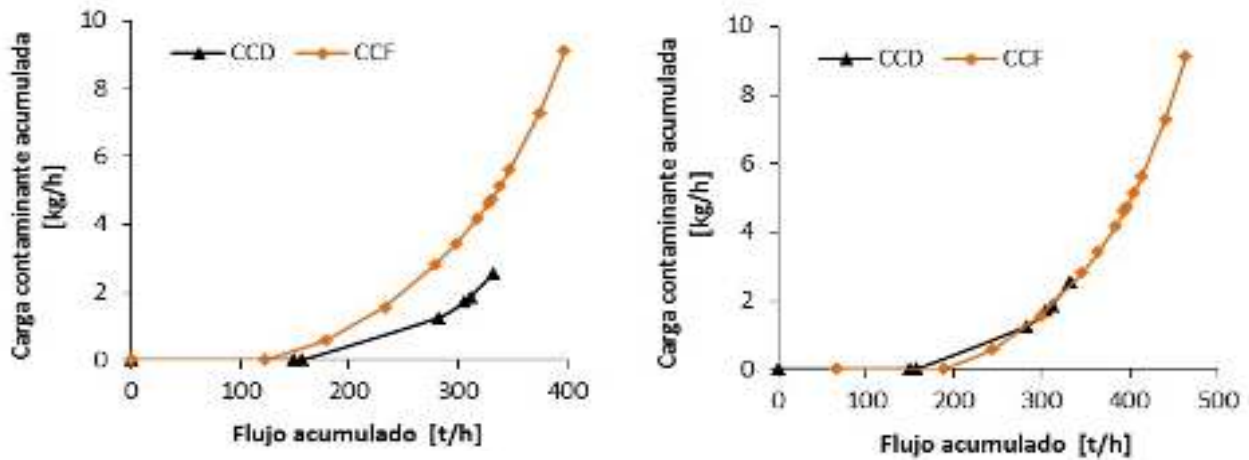


Figura 3. Curvas compuestas de las fuentes y las demandas (izquierda) y curvas desplazadas (derecha)

Es importante tener en cuenta que al incorporar 158,78 L/t_{caña} de agua la cantidad de efluente se incrementa hasta 0,35 m³/d.

En la figura 4 se muestra el resultado de aplicar el algoritmo del vecino más cercano para el rediseño de la red de agua. Según el criterio de calidad empleado (tabla 3), las demandas con concentraciones menores que la del pinch son: agua para caldera, alcalización e imbibición. Por ello es que en cada una de estas operaciones se emplea agua fresca. Es importante hacer notar que los resultados del NNA están sujetos al criterio de calidad fijado, mientras más restringido sea el criterio mayor será la demanda de agua fresca en cada una de las operaciones.

A pesar de no ser una práctica común el empleo de agua fresca para la imbibición y la alcalización, algunos autores alegan la necesidad del empleo de agua limpia en estas operaciones, pues esta formará parte del jugo que es una materia prima del proceso de producción (Chavez-Rodriguez et al., 2013). No obstante no se descarta el empleo de condensados de los evaporadores para suplir estas demandas.

Como se observa en la figura no es necesario el empleo de condensados de los calentadores, los cuales constituyen una fuente de menor calidad frente a los condensados de los evaporadores. El sobrante de condensados de calentadores es enviado a tanques de almacenamiento de condensados contaminados, los cuales son empleados en labores de limpieza e incluso para agua de riego si es adecuadamente diluido.

La producción de azúcar crudo es posible llevarla a cabo sin necesidad de incorporar agua externa si se lleva a cabo una adecuada política de manejo de los condensados (González y col., 2015; Rein et al., 2011). Por otro lado para lograr reducir los requerimientos mínimos es posible relajar las restricciones de calidad (aumentar las concentraciones requeridas por las demandas), siempre que estas permanezcan dentro del intervalo recomendado.

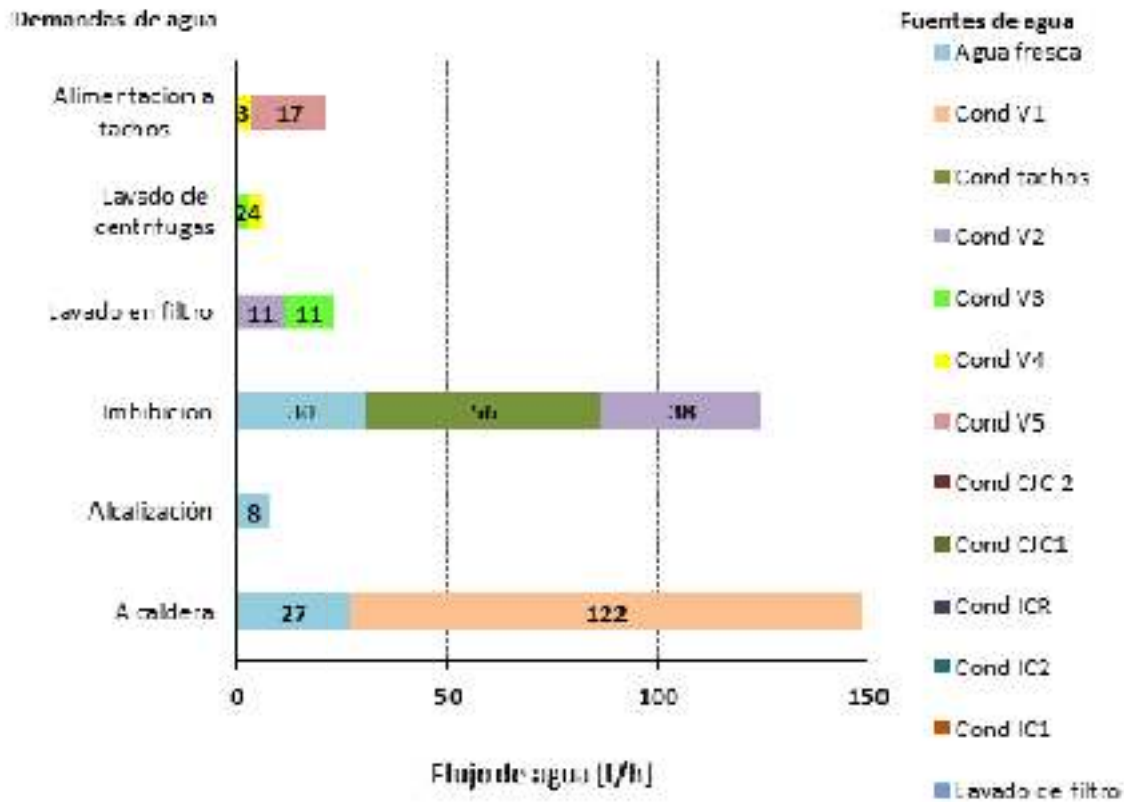


Figura 4. Red de distribución de agua de acuerdo a las fuentes y las demandas (Cond: Condensado, Vi: Vaso i del múltiple, CJC: Calentadores de jugo claro, IC: Calentador de jugo alcalizado, 1, 2 y R: primario, secundario y rectificador respectivamente)

Si se toman en cuenta estos criterios, es posible la construcción de las curvas compuestas a partir de las nuevas restricciones de calidad (figura 5). Para la construcción de las curvas compuestas de la figura 5 las concentraciones de las demandas se incrementaron hasta la mitad del intervalo reportado (ver tabla 3) como máximo.

La posición de las curvas compuestas en la figura 5 muestra claramente que es posible satisfacer las demandas de agua del proceso a partir de los condensados generados, sin incorporar agua externa. La figura 6 muestra la distribución de agua de acuerdo al algoritmo del vecino más cercano.

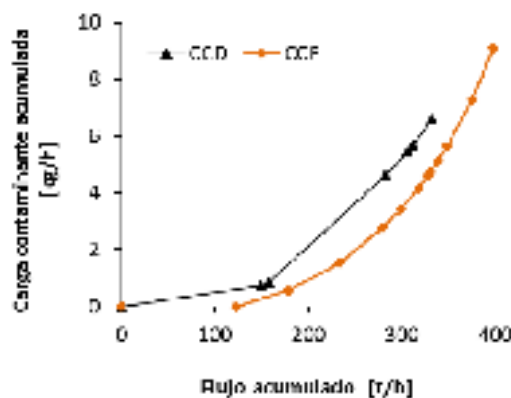


Figura 5. Curvas compuestas con nuevas restricciones de calidad

- Foo, D.C.Y., State of the Art Review of Pinch Analysis Techniques for Water Network., *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 48, No. 11, 2009, pp.5125-5159.
- González, M., Verelst, H., Espinosa, R., González, E., Simultaneous Energy and Water Minimization Applied to Sugar Process Production., *Chem Eng Trans*, Vol. 25, 2011, pp.177-182.
- González, M., Alomá, I., Espinosa, R., González, E., Tecnologías y sistemas para el manejo de agua y condensados en la producción de azúcar., *Centro Azúcar*, Vol. 42, No.1, 2015, pp.72-87.
- Hallale, N., Fraser, D.M., Capital cost targets for mass exchange networks. A special case: water minimisation., *Chemical Engineering Science*, Vol.53, No. 2, 1998, pp. 293-313.
- Lorenzo, J., Propuesta de alternativas para la integración de agua y energía en la producción de azúcar crudo., Tesis en opción al título de Máster en Análisis y Control de Procesos, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba, 2016.
- Mosqueira-Salazar, K.J., Palacios-Bereche, R., Chávez-Rodríguez, M., Seabra, J., Nebra, S.A., Reduction of water consumption in an integrated first- and second-generation ethanol plant., *Energy for Sustainable Development*, Vol. 17, 2013, pp.531-535.
- Pérez de Alejo, H.E., Goza, O.L., González, Y., Santana, R.M., Pérez, O.O., Perez, A., Sistema Termo Azúcar (STA). v4.1, 2014.
- Pina, E.A., Palacios-Bereche, R., Chavez-Rodriguez, M.F., Ensinas, A.V., Modesto, M., Nebra, S.A., Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane evaluation of different plant configurations., *Energy*, 2015, Available online: 27 July, DOI:10.1016/j.energy.2015.06.054.
- Polley, G.T., Núñez, M.P., López-Maciél, J.J., Design of water and heat recovery networks for the simultaneous minimisation of water and energy consumption., *Applied Thermal Engineering*, Vol.30, No.16, 2010, pp. 2290-2299.
- Prakash, R., Shenoy, U.V., Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations., *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 1, 2005, pp.255-268.
- Rein, P., *Cane Sugar Engineering*, 1st ed. Verlag Dr Albert Bartens KG, Berlin, 2007, pp. 679 - 692.
- Rein, P., Turner, P., Mathias, K., McGregor, K., Good management practices., *Manual for the sugar cane industry (Final)*, INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION, 2011, pp. 508 - 512.
- Urbaniec, K., Klemeš, J., Water and energy management in the sugar industry., in: *Handbook of water and energy management in food processing*, (Eds.) J. Klemeš, R. Smith, J.K. Kim, 2008, pp. 863-882.
- Wang, Y.P., Smith, R., Wastewater minimisation., *Chemical Engineering Science*, Vol. 49, No. 7, 1994, pp.981-1006.