

Título: Estudio para reducir las principales incertidumbres en la etapa inicial de instalación de una planta de etanol anexa a una fábrica de azúcar.

**M.Sc. Reinier Abreu Naranjo* Dr.C. Raquel DeLa Cruz Soriano*
Dr.Sc. Erenio González Suárez****

***Centro de Estudio de Energía y Procesos Industriales, Centro Universitario de sancti Spiritus, Ave. Mártires # 360, Sancti Spiritus, Cuba (e-mail: rabreu@suss.co.cu, raquel@suss.co.cu)**

****Centro de Análisis de Procesos, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villa, Carretera Camajuaní, Santa Clara, Villa Clara, Cuba (e-mail: erenio@uclv.edu.cu)**

Resumen:

Este trabajo se origina a partir de la necesidad de identificar y reducir las principales incertidumbres en la etapa inicial de inversión de una planta de etanol integrada a una fábrica de azúcar.

Para lo cual se realiza un estudio de seis capacidades de producción de etanol para distintas alternativas de integración material que consideran variaciones en las corrientes de jugo mezclado (JM), jugo de los filtros (JF) y miel B, utilizados como sustrato para la producción de alcohol combustible. Se selecciona como la de mayor flexibilidad de integración material a instalar en dicha empresa una capacidad de producción de etanol carburante de 200 mil litros diarios, a la cual se le realiza un estudio de factibilidad económica. Para ello se hizo uso de los indicadores económicos dinámicos y de sensibilidad para un intervalo de incertidumbre para los valores del VAN entre 83 y 227 millones, una intervalo de TIR de 17 a 44 %, un PRD en rango de los 2,3 a 5,2 años y un RVAN en el intervalo 1,59 a 6,76 \$/\$.

Palabras Clave: Caña de azúcar, etanol, integración de procesos, incertidumbres

INTRODUCCIÓN

La situación energética actual debe ser planteada como una crisis por la limitada vida de los combustibles fósiles, pero mucho antes de su agotamiento la situación será difícil. Ya en la actualidad es preocupante debido al alto precio que se cotiza el crudo.

A causa de esto muchos países cuentan hoy en día con un programa para el desarrollo de las energías renovables, entre las cuales podemos citar la no menos polémica, producción de etanol con fines energéticos, sin embargo no deja de ser real que la producción de etanol sobre bases sostenibles incluyendo el factor social - cultural, en los lugares donde estén creadas las condiciones objetivas y subjetivas para la misma, podrá aportar su granito de arena como las demás fuentes de energía renovables.

Por otro lado, la caña de azúcar perfila como principal fuente de materia prima para la producción de etanol, sin obviar lo antes mencionado, y su desarrollo sobre la base de una industria flexible e integrada tanto energética como material. Sin embargo sobre la instalación de toda planta de procesos existen un grado de incertidumbres que atentan contra la competitividad futura; fundamentado en que la vida útil de una instalación industrial necesariamente se extiende hacia el futuro, por lo que es necesario estudiar y reducir las principales incertidumbre asociadas a la instalación de una planta de etanol anexa a una fábrica de azúcar.

1.1 Desarrollo.

Determinación de las principales incertidumbres en la etapa inicial de la instalación de una planta de etanol anexa a una fábrica de azúcar.

De acuerdo a lo planteado por (Rudd and Watson, 1980) en cuanto a las principales consideraciones y principios metodológicos en las incertidumbres de la ingeniería de proceso para nuevas instalaciones, en primer lugar, corresponde a la determinación del mejor ajuste del diseño de un proceso a los cambios futuros. En el estudio donde se considera la instalación de una destilería anexa a fábrica de azúcar, cobra mayor importancia la determinación de la mejor capacidad de producción de etanol que permita la máxima flexibilidad de operación teniendo en cuenta la interdependencia operacional.

En segundo lugar, se encuentran las incertidumbres relacionadas con los datos de diseño y en el caso de estudio no es objetivo diseñar los equipos pero no se puede ignorar que en la medida que mayor sea el error en la determinación de la capacidad óptima, será mayor el grado de incertidumbres asociadas a este aspecto.

En tercero las fallas operacionales, componentes del proceso tecnológico y el diseño de instalaciones completas. Para un complejo integrado fábrica de azúcar – destilería anexa donde hay interdependencia de las corrientes materiales y energéticas entre ellas, es sumamente importante el haber determinado la capacidad de máxima flexibilidad que permita reducir incertidumbres en este sentido. Esto se explica que deben estar consideradas alternativas de operación, que en casos cuando el proceso tecnológico de obtención del azúcar se afecte, existan opciones operacionales que permitan a la planta de etanol continuar su producción. Y en cuarto lugar el efecto de las variaciones en el entorno en el diseño y operación de las instalaciones de procesos químicos donde se refleja una relación directa capacidad instalada – efectos medioambientales.

Finalmente las incertidumbres financieras, incorporadas como complemento a las consideraciones de Rudd y Watson por Twaddle y Malloy citado por (González, 2005) y no por eso son menos importantes que las anteriores, pues ellas por si solas son un factor suficiente para desechar una inversión. Por lo que, la capacidad elegida debe brindar seguridad económica, aún cuando varíen las condiciones objetivas que le dieron origen al proyecto. Destacar que aunque se haya realizado un análisis por separado de cada una, existe gran relación e influencias entre ellas y sobresalta como punto de partida y el efecto onda que trae consigo sobre las demás una mala determinación de la capacidad más flexible a los cambios futuros.

Por lo que el análisis de la etapa inicial de instalación de una planta de etanol integrada a una fábrica de azúcar, presta su atención en las que se consideran como las principales a:

Determinar la capacidad de producción de la destilería que mejor se ajuste a los cambios futuros.
Análisis de las incertidumbre económicas - financieras.

1.2 Caso de estudio Empresa Azucarera “Uruguay”, Sancti Spiritus, Cuba. Concepto de integración y condiciones de operacionales consideradas para la fábrica de azúcar – planta de etanol.

El primer paso correspondió a definir el concepto de integración planta de etanol fábrica de azúcar y para esto se utilizó el propuesto por (González et al., 2002), el cual plantea: “La integración material y energética ofrece alternativas atractivas de desarrollo diversificado, siempre y cuando se logre que la caña de azúcar sea a la vez la fuente de la energía (eléctrica, vapor) y el consumo fundamental de materia primas”. Sobre estas consideraciones se elaboró la figura 1 (Ver apéndice A).

Posteriormente se definieron las condiciones de operación de la fábrica de azúcar con una planta de etanol anexa según (De la Cruz, 2002).

- Producción de azúcar dos masas cocidas.
- 100 % de extracción de jugo de los filtros.
- Mayor disponibilidad de bajazo a destilería.
- Destinar miel B para la producción de etanol por poseer buenas cualidades como sustrato para la fermentación alcohólica.
- Capacidad de molida de 9200 t/d.
- Periodo de zafra 120 días.

Cálculos de azúcares fermentables y producción de etanol.

Se utilizó para el cálculo de los azúcares totales fermentables necesarios las ecuaciones propuestas por (Upadhlaya, 1998), (Estévez, 2006). Además se consideró que por cada 100 kg de azúcares fermentables se obtiene 64,4 litros de etanol (MACU, 1986).

$$AF_T = \frac{(AF_{T_JM} + AF_{T_JF} + AF_{T_mielB})}{E_{dest} * E_{ferm}} \quad (1)$$

$$AF_{T_JF} = \frac{(Q_{JF} * Pol)}{0,95} + Q_{JF} * \% reduc.L \quad (2)$$

$$AF_{T_JM} = \frac{(Q_{JM} * Pol)}{0,95} + Q_{JM} * \% reduc.L \quad (3)$$

$$AF_{T_mielB} = \frac{(Q_{mielB} * Pol)}{0,95} + Q_{mielB} * \% reduc.L \quad (4)$$

Donde:

0,95 \Rightarrow Factor de conversión estequiométrico. (Peso molecular de sacarosa/peso molecular de la sacarosa invertida).

$AF_T \Rightarrow$ Flujo de azúcares fermentables totales necesarios.

$AF_{T_JM} \Rightarrow$ Flujo de azúcares fermentables totales que aporta el jugo mezclado.

$AF_{T_JF} \Rightarrow$ Flujo de azúcares fermentables totales que aporta el jugo de los filtros.

$AF_{T_mielB} \Rightarrow$ Flujo de azúcares fermentables totales que aporta la miel B.

$Q_{JM} \Rightarrow$ Flujo de jugo mezclado a etanol.

$Q_{JF} \Rightarrow$ Flujo de jugo de los filtros.

$Q_{mielB} \Rightarrow$ Flujo de miel B.

$Pol \Rightarrow$ Por ciento de sacarosa.

$\% reduc.L \Rightarrow$ Por ciento de reductores libres.

$E_{dest} \Rightarrow$ Eficiencia de destilación.

$E_{ferm} \Rightarrow$ Eficiencia de fermentación.

Posteriormente se definió el rango de capacidades de producción de etanol a estudiar; con el propósito de reducir las principales incertidumbres asociadas a la misma, por lo que se originó trabajar un espectro de capacidades de producción diaria para determinar la más flexible desde el punto vista material empresa azucarera – destilería en correspondencia a las condiciones tecnológicas consideradas.

Lo que dio a lugar analizar seis capacidades: 200 mil, 250 mil, 300 mil, 350 mil, 400 mil y 450 mil litros diarios de producción de etanol.

1.3 Procedimiento para definir las alternativas de combinación de sustrato en la integración material planta de alcohol – empresa azucarera.

Para lograr una mayor flexibilidad entre la planta de azúcar y la destilería anexa, desde el punto de vista de integración material y adecuación a las exigencias del mercado internacional con respecto a los principales productos de venta, se elaboró el procedimiento descrito en la figura 2. El cual se aplico a cada una de las capacidades seleccionadas

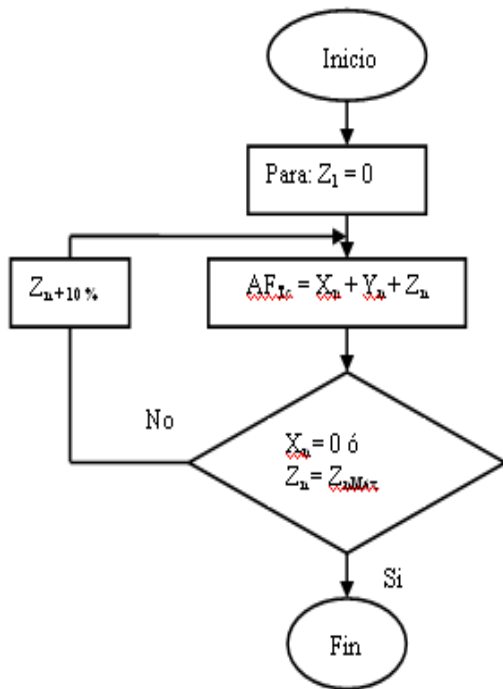


Figura. 2. Metodología aplicada para definir alternativas para reducir incertidumbres en la integración material entre una fábrica de azúcar y una planta de etanol carburante, teniendo en cuenta el suministro de los azúcares fermentables totales.

Donde:

$AF_{TC} \Rightarrow$ Azúcares fermentables totales necesarios para la producción de etanol fijada.

$X_n \Rightarrow$ Por ciento de los azúcares fermentables a cubrir con jugo mezclado para cada alternativa.

$Z_{nMax} \Rightarrow$ 100 por ciento de miel B producida de acuerdo a las condiciones de operación fijadas para cada alternativa.

$Y_n \Rightarrow$ Por ciento de los azúcares fermentables que se puede cubrir con la extracción del 100 % de los jugos de los filtros para cada alternativa.

$Z_n \Rightarrow$ Valor fijado del por ciento de azúcares fermentables a cubrir con miel B para cada alternativa.

2.1 Análisis y discusión de los resultados.

Se procedió a los cálculos de los flujos de materiales para cada alternativa de sustrato para las seis capacidades. En total se analizaron 29 alternativas de operación. En la tabla .1 muestra las sietes alternativas de integración material sobre las bases de los azúcares fermentables y distintas fuentes de sustrato obtenidas para una capacidad de producción de 200 mil litros diarios.

Tabla 1. Alternativas de operación para diferentes combinaciones de sustrato para capacidad de producción de 200 mil litros diarios

Alter nativas	Capacidad de producción 200 mil l/d	Días post-zafra (miel B almacenada)
A 1	62,77JM + 37,23JF + 0Miel B	102
A 2	50,89JM + 39,23JF + 10Miel B	88
A 3	38,72JM + 41,25JF + 20Miel B	74
A 4	26,85JM + 43,23JF + 30Miel B	60
A 5	14,68JM + 45,25JF + 40Miel B	47
A 6	2,81JM + 47,22JF + 50Miel B	33
A 7	0JM + 47,69JF + 52,31Miel B	30

Como se puede observar en la tabla 1, para la primera alternativa donde es máximo el por ciento de extracción de jugo mezclado y cero la utilización de miel B implica un menor volumen de jugo de los filtros para la producción de etanol y menor la producción de azúcar, hace que también sea en menor cuantía el volumen de jugo filtro obtenido que se destina a los azúcares fermentables, si opera en esta condiciones tecnológica permite almacenar la miel B producida para un periodo de operación post zafra.

Si por lo contrario a medida que se destina miel B para la producción de alcohol, se reduce el por ciento de extracción de jugo mezclado, por lo que aumenta el flujo de jugo de los filtros, hasta llegar a la séptima alternativa donde se cubren los azúcares fermentables con una combinación solo de jugo de los filtros y miel B y se dispone de la menor cantidad de miel B para operar en periodo de no zafra.

La figura 3, muestra los diferentes flujos de materiales destinados para la producción de etanol para las diferentes alternativas de sustrato.

Como se había hecho mención anteriormente en la alternativa 1, al ser en la que se almacena toda la miel se puede operar con la misma 102 días periodo de no zafra, por lo que se alcanza para esta disponibilidad de sustrato la mayor producción de etanol con respecto a las demás y la menor producción de azúcar anual para está capacidad de producción como se puede apreciar en la figura 4.

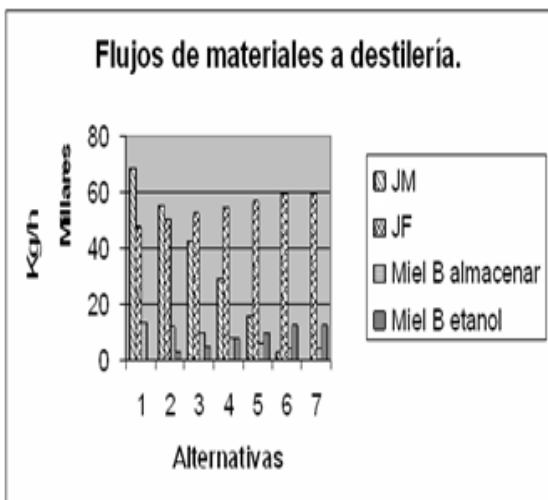


Figura 3. Los flujos de másico a destilería para sustrato para la producción de 200 mil litros diarios.

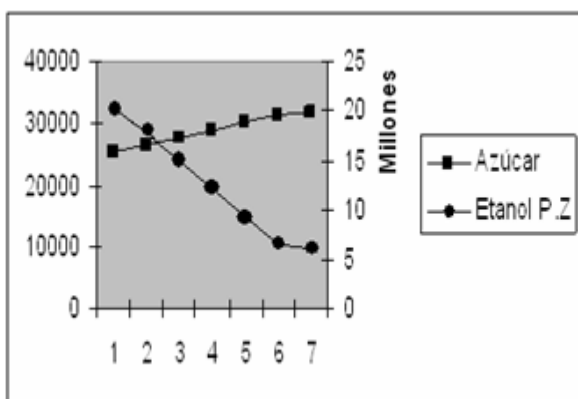


Figura 4. Tendencia de la producción de azúcar y etanol para las diferentes alternativas de operación.

Si se opera en las condiciones fijadas para las primeras alternativas se prioriza la producción de etanol en detrimento de la producción de azúcar y viceversa en la medida que nos acercamos a las consideraciones operacionales para la alternativa 7. Se procedió de igual forma para las cinco capacidades de producción de etanol restantes, en modo de resumen de los resultados se presenta la figura 5.

Se obtuvo el mayor número de alternativas de integración de sustrato para las capacidades de 200 mil y 250 mil litros diario, con la desventaja de que para esta última en lo adelante todas las capacidades de producción de etanol dependen de la extracción de jugo mezclado para poder mantener su niveles de producción.

De forma general se concluyó que con el crecimiento de la capacidad de producción de etanol, disminuyó las toneladas de azúcar producidas, el número de alternativas de integración fue menor; así como un aumento a la dependencia de extracción de jugo mezclado, lo que originó un menor flujo de miel y jugo de los filtros para la producción de etanol en periodo zafra y post zafra, lo que reduce las alternativas de integración y por ende menos flexibilidad frente a las incertidumbres propias de la industria azucarera y a los cambios eventuales que esta está sometida; como paradas de la fábrica de azúcar no programadas, fallo en el abastecimiento de materia prima, variación en los parámetros de operación, solo por mencionar algunas.

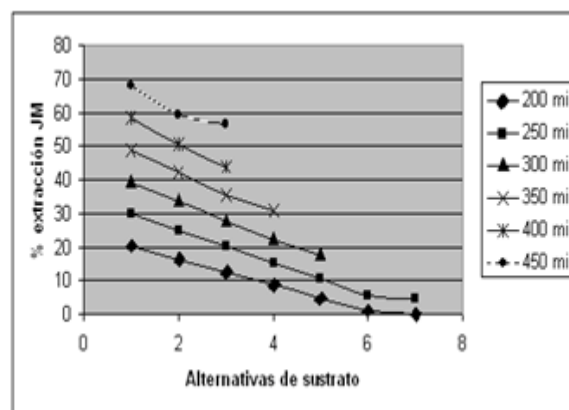


Figura 5. Por ciento de extracción de jugo mezclado contra diferentes alternativas de integración material para diferentes capacidades de producción de etanol carburante anexas a la planta de azúcar.

2.2 Análisis económico de la inversión de la destilería 200 mil litros diarios anexa a la fábrica de azúcar en condiciones de incertidumbres.

Se determinó como la capacidad de producción de etanol a instalar de mayor flexibilidad la de 200 mil litros diarios de acuerdo con las condiciones de operación consideradas, sin embargo la capacidad elegida debe garantizar factibilidad económica. Para ello se realizó un análisis económico basado en los indicadores dinámicos y análisis de sensibilidad.

En la tabla 2 se presenta los principales costos para la inversión de una destilería de 200 mil litros diarios.

Destilería de 200 mil l/d	\$
Costo total de inversión	24 364 327,2
Costos directos.	11 945 343,78
Cargos fijos	697 897,8263
Gastos Generales	807 015,4215
Costo Total Producción Alcohol	13 450 257,02
Total	37 814 584,22

Tabla 2. Datos para la inversión de una destilería de 200 mil litros diarios.

Para el estudio de factibilidad económica aplicado a las siete alternativas analizadas se fijaron las tasas de interés y de descuento en un 15 %, también se tuvo en cuenta los niveles de producción característicos de cada una de ellas, determinadas por los balances de materiales con la ayuda de software SISTEC; para un periodo de zafra de 120 días. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3. Valores de los indicadores dinámicos para una destilería de 200 mil litros diarios.

Alternativas	VAN (10 ⁴ \$)	TIR (%)	PRD (años)	RVAN (\$/\$)
Alternativa 1	227	44,34	2,3	6,76
Alternativa 2	198	39,35	2,9	5,42
Alternativa 3	170	34,49	3,2	4,47
Alternativa 4	143	29,49	3,9	3,4
Alternativa 5	117	24,63	4,2	2,67
Alternativa 6	89	18,94	4,9	1,85
Alternativa 7	83	17,63	5,2	1,59

Como se puede apreciar en la tabla 3 para las condiciones consideradas existe una clara tendencia a un menor valor del VAN, con la disminución del por ciento de extracción de jugo mezclado para la producción de etanol, pero no es menos cierto que aún en la alternativa siete con cero por ciento de extracción y operando con la miel B, más jugo de los filtros en los 120 días de zafra, y miel B los restante 30 post zafra, con la miel B acumulada. Son favorables las ganancias económicas con un VAN por encima de los 83 000 000, una TIR de 18 % y un RVAN de 1,59.

Cualquier combinación de estas en el periodo de tiempo de vida útil sin variar los precios de venta considerados, registraría una incertidumbre en el intervalo del VAN entre 83 millones y los \$ 227 millones.

2. Análisis de la disponibilidad de bagazo como combustible para una industria azucarera diversificada.

Un aspecto que se consideró de gran influencia en el costo operación por los altos precios del crudo, es el combustible a utilizar para la generación de vapor, para el periodo de zafra y no zafra.

Para ello se realizó los balances de disponibilidad de bagazo de acuerdo a los requerimientos de ambos proceso en correspondencia con las condiciones tecnológica analizadas. El estudio se le aplicó a las alternativas de tecnológicas 1 y 7 como modo operación extremas.

Los resultados se muestran en la tabla 4 y 5 respectivamente.

Tabla 4. Balance de disponibilidad de bagazo para la generación de vapor para la producción de azúcar y etanol en zafra y post zafra: Alternativa 1: 62,77JM + 37,23JF + 0Miel B

Azúcar		%
Vapor consumido azúcar (kg/h)	181 730,76	
Bagazo producido (kg/h)	129 420,01	
Bagazo consumido (kg/h)	79 013,374	61,05
Etanol		
Capacidad producción (l/d)	200 000	

Zafra		
Vapor necesario (kg/h)	20 833,333	
Bagazo consumido (kg/h)	9057,971	6,99
Bagazo almacenar (kg/h)	41 348,665	31,94
Días de zafra	120	
Bagazo almacenar total (kg)	119 084 155	
Post zafra		
Días de operación	102	
Producción de etanol (l)	20 400 000	
Vapor necesario (kg)	51 000 000	
Bagazo necesario (kg)	22 173 913	
Bagazo sobrante (t)	96 910,242	

Para estas condiciones de integración material y energética, sí se opera extrayendo el 20 % de jugo de mezclado, 100 % del jugo de los filtros y a dos masas cocidas; la disponibilidad de bagazo cubre las necesidades energéticas para ambas producciones tanto para periodo de zafra, como fuera de zafra para la producción de etanol. Además

de quedar un excedente de bagazo, el cual puede ser fuente de materia prima para la producción de etanol o la generación de electricidad.

Igual procedimiento se empleo para la alternativa 7, para cual la disponibilidad de bagazo va a ser menor comparada con las restantes alternativas de integración, sin embargo aún así el bagazo producido es suficiente para las exigencias energéticas en periodo de zafra y post zafra para ambas producciones, como se muestra en la siguiente tabla 5.

Tabla. 5. Balance de disponibilidad de bagazo para la generación de vapor para la producción de azúcar y etanol en zafra y post zafra: Alternativa 7: 0JM + 47,69JF + 52,31Miel B.

Azúcar		%
Vapor consumido azúcar (kg/h)	225 776,654	
Bagazo producido (kg/h)	129 420,01	
Bagazo consumido (kg/h)	98 163,7626	75,84
Etanol		
Capacidad producción (l/d)	200 000	
Zafra		
Vapor necesario (kg/h)	20 833,3333	
Bagazo consumido (kg/h)	9 057,97101	6,99
Bagazo almacenar (kg/h)	22 198,2764	17,15
Días de zafra	120	
Bagazo almacenar total (kg)	63 931 036	
Post zafra		
Días de operación	30	
Producción de etanol (l)	6 000 000	
Vapor necesario (kg)	15 000 000	
Bagazo necesario (kg)	6 521 739,13	
Bagazo sobrante (t)	57 409,29	

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Empresa Azucarera Uruguay de Jatibonico y el Instituto de Proyecto Azucarero, IPROYAZ.

REFERENCIAS

De la Cruz S. R (2002). *Aplicación del Análisis Complejo de Procesos en el estudio de alternativas de integración de una fabrica de azúcar y una planta de alcohol. Tesis presentada en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.* UCLV, Cuba.

Estévez F. R (2006). *Balances de azúcares fermentables y materiales para la instalación de una destilería de 450 mil litros diarios en fábrica de azúcar "Uruguay"*. Hoja de cálculo de excel. IPROYAZ, Sancti Spiritus.

González S. E (2002). *Los problemas de incertidumbres en el desarrollo diversificado integrado de la industria de la caña de azúcar.* *Cen. Azúc.* **29 (4)**, pp. 54 – 61, octubre – diciembre.

González S. E (2005). *Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria de procesos químicos fermentativos y farmacéuticos.* Editorial científico – técnica. La Habana.

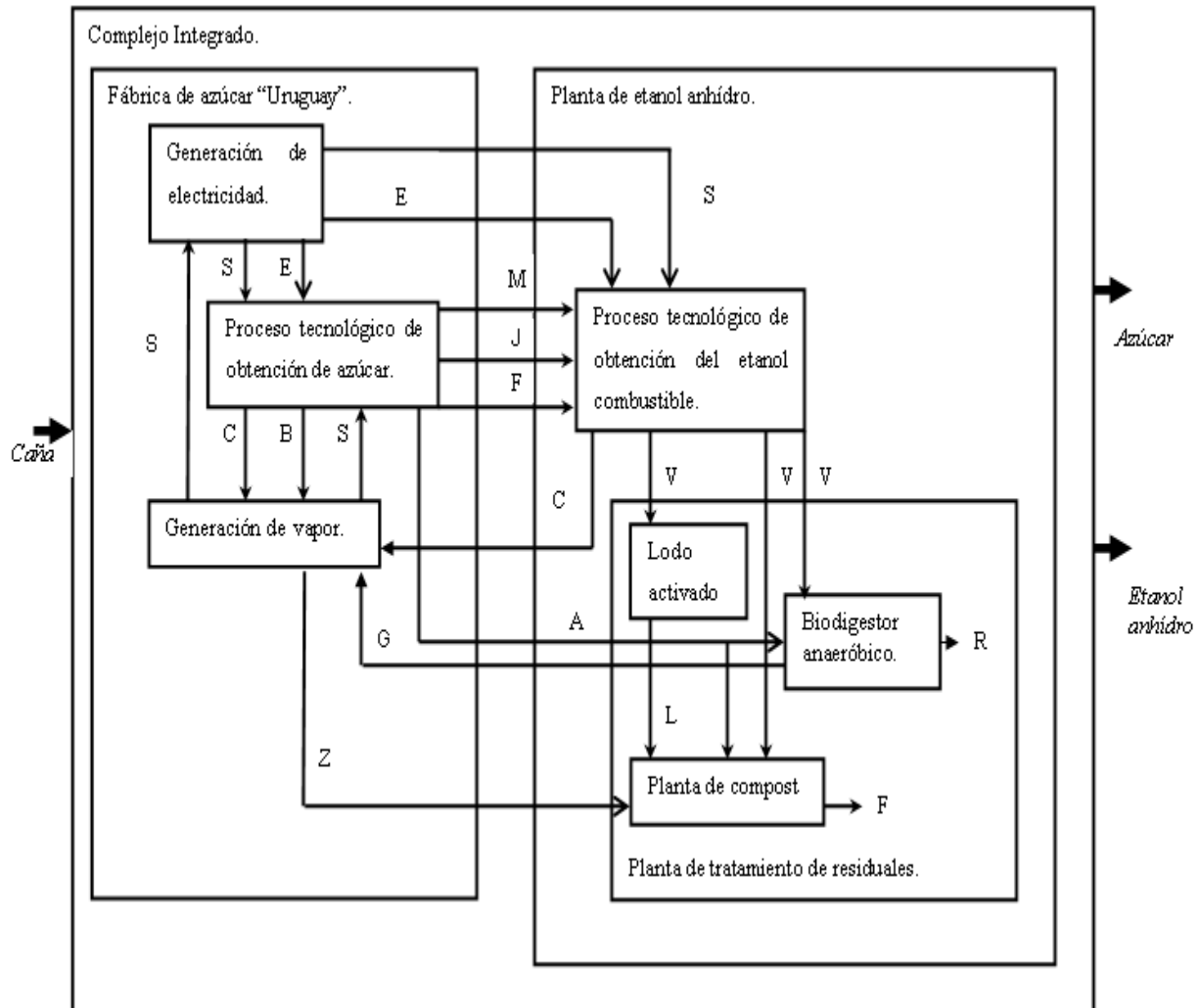
MACU (1986). *Manual Analítico para el control Unificado de Alcohol y levadura Saccharomyces. Tomo I y II.* Ed. MINAZ. pp. 45 – 48

Rudd F. D. and C. Watson (1980). *Strategy of Process Engineering.* Ed. Reolucionarias. La Habana. pp. 269 – 273.

Upadhlaya U.C (1998). *Cogeneración de vapor y corriente eléctrica.* Ed. Minaz. Sancti Spiritus. pp. 15 – 19.

Apéndice A.

Figura 1. Diagrama de bloque del concepto de complejo integrado, fábrica de azúcar – planta de etanol anhído considerado en el estudio.



Legenda:

- | | | |
|-------------------------|----------------------------------|-----------------|
| J (Jugo de mezclado) | S (Vapor) | Z (Cenizas) |
| F (Jugo de los filtros) | E (Electricidad) | A (Cachaza) |
| M (Miel B) | V (Vinazas) | G (Biogás) |
| B (Bagazo) | L (Lodo) | C (Condensados) |
| F (Biofertilizantes) | R (Residuales líquidos tratados) | |