

## Titulo

# **Estrategia investigativa para el escalado industrial de una nueva tecnología de obtención de etanol de bagazo de caña de azúcar**

## **Research strategy for industrial scale up of one new technology of ethanol production from sugarcane bagasse**

**Yaser Oliva Conyedo<sup>1</sup>, Layanis Mesa Garriga<sup>2</sup>, Erenio González<sup>2\*</sup>, Víctor González Morales<sup>2</sup>.**

**1) Empresa Comercializadora de Petróleos, CUPET, Villa Clara, Cuba.**

**2) Centro de Análisis de Procesos, Universidad Central, de Las Villas, Cuba.**

### Resumen

En el trabajo se conceptualizan los aspectos claves y se presenta la propuesta de un procedimiento para el escalado a nivel industrial, con ayuda de una Planta Piloto, de una tecnología para la obtención de etanol y coproductos en el concepto de biorrefinería de bagazo de caña de azúcar. Acorde con el procedimiento propuesto se determinan mediante la vigilancia tecnológica los requerimientos para el escalado industrial de una nueva tecnología para la obtención de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar y se ejecutan y validan los pasos del procedimiento de escalado, de una nueva tecnología de etanol a partir de residuos lignocelulósicos, que anteceden y preparan los estudios a nivel de Planta Piloto de una tecnología de producción de etanol de bagazo caña de azúcar.

**Palabras clave:** Etanol, planta piloto, bagazo de caña, escalado.

### ABSTACT

The key aspects are conceptualized and the proposal of a procedure is presented for the scale up at industrial level, with the help of a Plant Pilot, of a technology for ethanol and by-products production in the biorefinery concept from sugarcane bagasse. According with the proposed procedure is determined through the technological surveillance the requirements for the industrial scale up of a new technology for the bioethanol production from sugarcane bagasse and they are executed and validate the steps of the procedure of scale up, of a new technology of ethanol production from lignocelulosic residues, that they precede and prepare the studies at Plant Pilot level.

**Key words:** Etanol, pilot plant, sugarcane bagasse, scale up.

## Introducción

El desarrollo de tecnologías de obtención de productos químicos de alto valor agregado incluyen labores de ingenierización que deben ser consideradas en todas las etapas de la investigación, no obstante, etapas específicas para el escalado a nivel de banco y de Planta Piloto es recomendable que se incluyan en toda estrategia investigativa,<sup>11</sup> por lo que como una continuación de los resultados obtenidos a nivel de laboratorio con equipos a escala de banco,<sup>6</sup> se ha concebido el escalado industrial de una tecnología para la obtención de etanol de bagazo de caña de azúcar (PTMI, 2010), que requiere una concepción de investigación.

## Desarrollo

La planta continua de laboratorio (miniplanta) se diseña, se establece y se pone a funcionar. Su concepción es una planta pequeña pero completa con todos los reciclos, interrelaciones y maneja cantidades entre 100 gr/h, contiene la reacción de síntesis y todo lo demás.

Confirmado el concepto de proceso en la miniplanta el próximo paso es diseñar y establecer una planta de ensayo de mayor capacidad, su tamaño se enmarca entre una miniplanta y la de producción industrial. La cantidad producida debe ser de unas t/a y su objetivo consiste en ensayos de aplicación del producto o estudios de uso en mayor escala por los consumidores. La operación de la planta piloto hace posible completar y verificar la información de datos y documentaciones obtenidas en las etapas anteriores del desarrollo del proceso. El factor de escalado de una etapa a la otra está siempre limitado por el principio de mínimo, o sea: la etapa de proceso o el equipo de menor factor de escala determinan la capacidad máxima de la próxima instalación y cuyas condiciones de performance puedan ser calculadas. Es aquí donde el ingeniero de procesos puede ahorrar dinero y tiempo.

La tarea más importante es encontrar los puntos débiles y someterlos a un análisis específico para ser mejorados y así con el proceso completo tantas veces como se requiera. El problema es que muchas decisiones pueden ser tomadas de forma incompleta por su conocimiento, pero esto es inevitable. Un desarrollo sin incertidumbre es tan errado como comenzar una planta industrial solo con los resultados del laboratorio.

Se deben valorar tantas posibilidades como sea posible en una etapa preliminar, de forma tal, que un gran número de ellas queden restringidas al laboratorio. Investigaciones de variantes a nivel de planta de ensayo deben evitarse por costo y tiempo.

Se cometen algunos errores al principio, pero eliminarlos es barato y rápido en una variante. Estos errores no deben ser ya en escalas mayores ya que serían costosos y difíciles de eliminar. Una planta piloto puede ser necesaria por el riesgo de escalado para llevar directo de una miniplanta a escala industrial. Esto puede ser debido a:

·El proceso presenta diversas etapas críticas que no pueden describirse por modelos físicos.

·Se está desarrollando una nueva tecnología, por su dificultad y porque sea completa.

Tareas a ejecutar en las plantas pilotos son:

1. Chequeo de cálculos de diseño.
2. Solución de problemas de escalado.
3. Chequeo de resultados experimentales obtenidos en la miniplanta.
4. Medida de los perfiles de temperatura en el reactor y en las columnas bajo condiciones adiabáticas.
5. Ganar el Know-How del proceso.
6. Producción de cantidades representativas de productos para muestras.
7. Entrenamiento de personal.
8. Precisión de fallos de acceso de pequeños flujos.
9. Mejoras de los estimados de vida de servicio.
10. Ensayo de materiales bajo condiciones reales.
11. Evaluar económicamente el proceso.

Construir y operar una planta piloto es una decisión muy costosa que puede representar el 10 % del valor de la planta comercial. Además si se trabaja con sustancias tóxicas, generalmente demora mucho en ponerla a funcionar.

De acuerdo con lo anterior se propone el diagrama heurístico siguiente para el escalado de los resultados del laboratorio hasta nivel de Planta Industrial considerando el uso de una instalación del tipo Planta Piloto (figura 1).

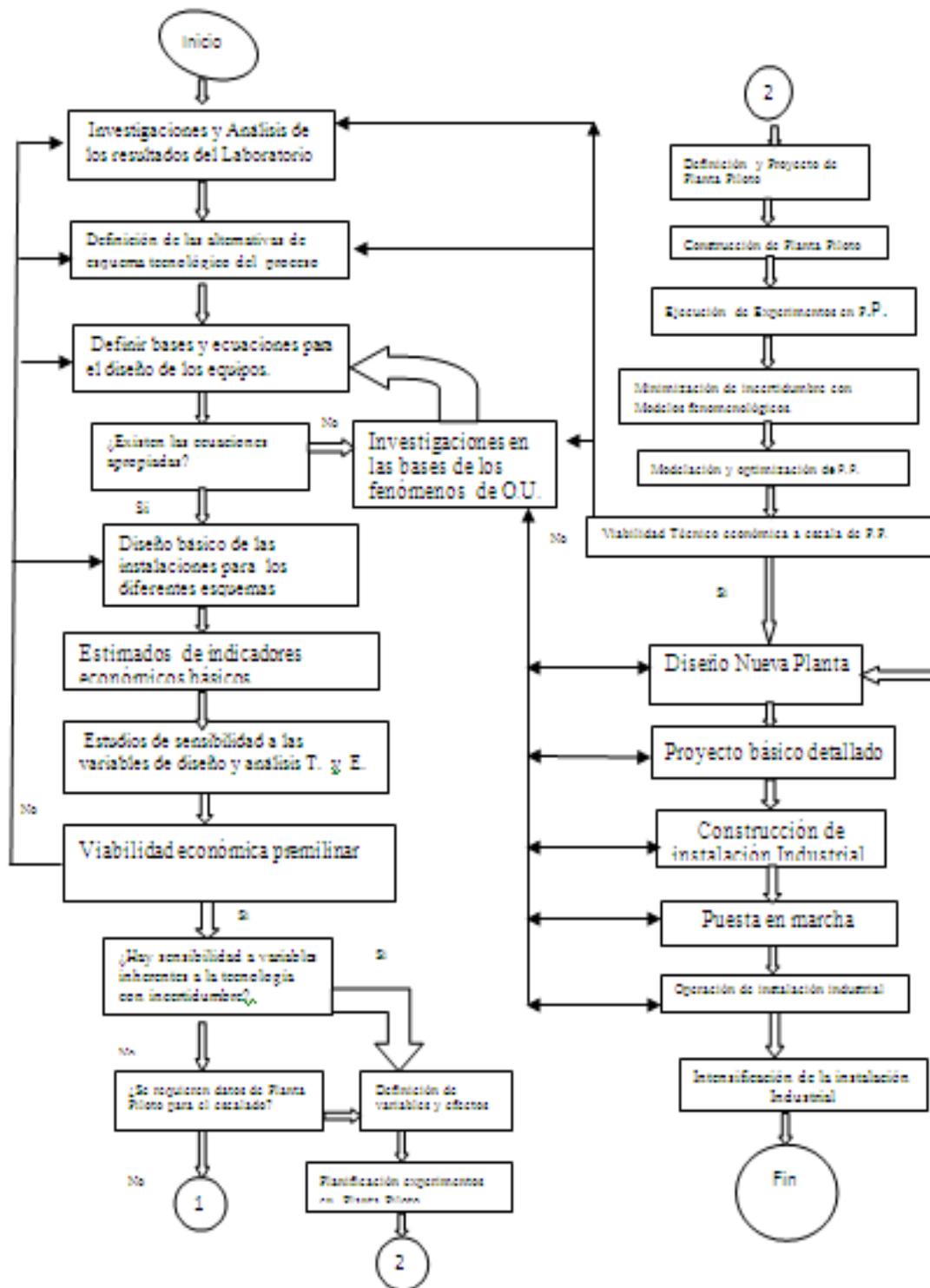


Figura 1. Diagrama heurístico de la investigación para el escalado de la

### Definición del Esquema Tecnológico

Según las tecnologías existentes para la obtención de bioetanol, reportadas en la literatura, por diferentes autores y con los estudios anteriores .....<sup>6</sup> se llegó a definir un esquema tecnológico.

Este esquema consta de dos etapas de fraccionamiento. En la primera, cuando se obtiene xilosa como producto para la obtención de etanol, la biomasa se somete a la acción de una solución de ácido Sulfúrico al 1 % v/v en presencia de vapor a 120 °C y una relación sólido/ líquido de 1:4 Kg: L. Cuando la primera etapa está dirigida a la obtención de furfural, la temperatura es 175 °C, la concentración de ácido sulfúrico es 1 % en masa en base a la fibra seca y la relación sólido-líquido es 1:1 kg:L. El tiempo de residencia de ambas alternativas es 40 minutos. Posteriormente, el sólido resultante de cada alternativa se trata con una solución de hidróxido de sodio y etanol al 5 % masa en base a fibra seca y 30 % v/v, respectivamente, también con vapor a 185 °C. La relación sólido-líquido es 1:7 y el tiempo de residencia de la segunda etapa de pretratamiento es 60 minutos considerando tiempos de carga y descarga de 20 minutos para cada variante.

Luego de terminado el pretratamiento en dos etapas, la biomasa se somete a la acción de las celulasas por un término de 24 a 36 horas, en el cual se obtiene una solución de azúcares listos para fermentar con levaduras del tipo *S. Cerevisiae*. Esta operación se puede realizar de 3 formas diferentes:

1. Sacarificación y Fermentación Separadas.
2. Presacarificación y Fermentación.
3. Sacarificación y Fermentación Simultáneas.

Derivado de este proceso se obtiene un fermento con el grado alcohólico necesario para ser destilado en una columna de destilación.

De lo anteriormente expuesto se derivan 6 variantes tecnológicas las cuales se enumeran a continuación:  
Variante 1: Sacarificación y fermentación separadas con primera etapa a 120 °C

Variante 2: Presacarificación y fermentación con primera etapa a 120 °C

Variante 3: Sacarificación y fermentación simultáneas con primera etapa a 120 °C

Variante 4: Sacarificación y fermentación separadas con primera etapa a 175 °C

Variante 5: Presacarificación y fermentación con primera etapa a 175 °C

Variante 6: Sacarificación y fermentación simultáneas con primera etapa a 175 °C

### Definición de las bases y ecuaciones para el diseño de los equipos

De acuerdo a las características peculiares de cada etapa básica, la producción de bioetanol y sus coproductos, se llevará a cabo en una planta de forma semicontinua. Capacidad de producción de **100 litros de etanol diarios, se operará 8 horas al día, durante 5 días a la semana. (300 días al año).**

Para cada una de las 6 variantes tecnológicas se calcularon los balances de materiales y energía y se seleccionó el equipamiento adecuado según lo reportado por Mesa, L<sup>6</sup>.

Los principales equipos se muestran a continuación:

1. Sistema de manipulación de bagazo de alimentación.
2. Bomba de dosificación de ácido sulfúrico.
3. Digestores (reactores) para la reacción ácida de separación de los pentosanos, con inyección de vapor.
4. Sistema de recuperación y condensación de los componentes de interés económico de los vapores de la primera etapa (al menos etanol).
5. Conductor de residuo lignocelulósico de primera etapa y prensa de tipo tornillo de separación y conducción hasta segunda etapa.
6. Bomba de dosificación de hidróxido de sodio.
7. Bomba de alimentación de agua para ajuste de hidromódulo y sistema de lavado de sólidos pretratados.
8. Bomba de alimentación de agua de enfriamiento.
9. Bomba de alimentación de agua para recirculación de corrientes acuosas en el proceso.
10. Digestores (reactores) para la reacción básica de separación de la lignina con inyección de vapor.
11. Sistema de recuperación y condensación de los componentes de interés económico de los vapores de la segunda etapa (al menos etanol).
12. Conductor de residuo lignocelulósico de segunda etapa y prensa de tipo tornillo de separación y conducción hasta etapa de hidrolizado.
13. Tanque de almacenamiento de aguas de lavado de la segunda etapa.
14. Equipos de la etapa de hidrólisis enzimática.

1. Tanque de almacenamiento de jarabe producto de la sacarificación.
2. Equipos de evaporación y concentración de los jarabes.
3. Sistema de condensado de los vapores de la etapa de concentración de los jarabes.
4. Etapa de fermentación alcohólica.
5. Etapa de destilación.

Resultados del Balance de materiales

A modo de ejemplo se reporta en la tabla 1 los resultados del balance de materiales para el esquema de la primera variante tecnológica.

**Tabla 1. Balance de masa para la variante tecnológica 1**

Kg/día	PRETRATAMIENTO 1					PRETRATAMIENTO 2				
	BI	Ac	Agua	LP1	MC1	Etanol	NaOH	Agua	LP2	MC2
Glucosa	164,1			10,5	153,6				14,2	139,3
Xilosa	103,8			80,3	23,5				8,9	14,6
Lignina	64,8			0,6	64,2				20,3	43,9
Agua	17,3		1400,0	854,2	563,1			609,7		
Acido		3,5								
Etanol						642,1				
NaOH							12,1			
Total	350,0	3,5	1400,0	945,6	804,4	642,1	12,1	609,7	43,4	197,9

Kg/día	HE		EVAPOR, GLU		FERM GLUC		FERM PENT		DESTILACION			
	LicAzu	SDes	Ag Ev	LicConc	CO2	Lic Ferm	CO2	Lic Ferm	F	Vapor	D	W
Glucosa	101,8	37,6		101,8								
Xilosa	10,9	3,7		10,9								
Lignina	0,0	43,9										
Agua	2088,9	85,9	1353,5	735,5		756,6		608,3	1364,9		4,1	1878,4
Vapor										517,6		
Etanol						46,7		31,0	77,7		77,6	0,0
CO2					44,9		29,7					

Total	2201,6	171,1	1353,5	848,2	44,9	803,3	29,7	639,2	1442,5	517,6	81,7	1878,4
-------	--------	-------	--------	-------	------	-------	------	-------	--------	-------	------	--------

La diferencia entre las variantes restantes está dada fundamentalmente por el rendimiento de etanol por kg de bagazo, calculado previamente en el laboratorio y reportado por Mesa L<sup>6</sup>.

El dimensionamiento de los equipos se realizó tomando como base las ecuaciones de diseño de cada uno de ellos.

**Tabla 2. Parámetros tomados para el dimensionamiento de los equipos de cada etapa de la tecnología**

ETAPAS	EQUIPOS	ECUACIONES
PRETRATAMIENTO 1	REACTOR 1	Ecuaciones de volumen de un cilindro con fondo cónico. Considerando tiempo de residencia. (Levenspiel, 1974)
	Condensador de los vapores para reactor 1	Metodología de cálculo de condensadores de tubos y coraza. (Kern, 1999)
	Prensa Lavadora	Ecuaciones de diseño mecánico.
PRETRATAMIENTO 2	REACTOR 2	Ecuaciones de volumen de un cilindro con fondo cónico. Considerando tiempo de residencia. (Levenspiel, 1974)
	Condensador de los vapores para reactor 2	Metodología de cálculo de condensadores de tubos y coraza. (Kern, 1999)
	Prensa Lavadora	Ecuaciones de diseño mecánico.
ETAPAS	EQUIPOS	ECUACIONES
HIDROLISIS ENZIMÁTICA	Reactor hidrólisis enzimática	Ecuaciones de volumen de un cilindro horizontal. Considerando tiempo de residencia.
EVAPORACIÓN	Evaporador de doble efecto	Metodología de cálculo para evaporadores de doble efecto. (Kern, 1999), (Kasatkin, 1971), (McCabe, 1991)
FERMENTACIÓN	Fermentadores	Ecuaciones de volumen de un cilindro. Considerando tiempo de residencia. Garcia A, Rico I
DESTILACIÓN	Columna empacadas con anillos Raching	Metodología de Mc Thiele para las etapas teóricas. (Treybal, 1986), (McCabe, 1991),(Pavlov, 1980)

	Condensador de etanol	Metodología de cálculo de condensadores de tubos y coraza. (Kern, 1999)
--	-----------------------	---

Con los estimados de costo reportados por Peters<sup>9</sup> y los resultados del diseño y del balance de materiales se calcularon los costos inversionistas y los costos totales de producción. Los principales resultados se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3. Estimados de los indicadores económicos básicos para cada una de las alternativas**

V	Bagazo Kg/día	Furfural Kg/día	Capital Invertido, \$ 10 <sup>6</sup>	CTP, \$/año	Costo Enzima, \$/año	Costo Bagazo, \$/año	Costo Vapor, \$/año	Costo Unitario, \$/1	Costo X Peso
1	350,00	no	1,531	269299,2	3982,66	2205,00	4823,2	8,98	14,41
2	284,00	no	1,103	191873,5	3231,65	1789,20	1667,3	6,40	12,35
3	382,00	no	1,319	230771,5	4346,79	2406,60	1889,1	7,69	14,76
4	538,00	62,09	1,849	331406,3	6405,90	3389,40	5488,1	11,05	7,94
5	560,00	95,86	1,479	264576,1	6667,85	3528,00	1292,3	8,82	6,82
6	589,00	100,82	1,521	272582,2	7013,15	3710,70	1307,0	9,09	6,81

A pesar de que los resultados en los indicadores económicos son desfavorables por estar evaluando la tecnología a escala Piloto, este tipo de análisis nos indica cuál de las 6 alternativas presenta mejores resultados y así poder discriminar posibles análisis futuros.

## Conclusiones

1. Los estudios experimentales a nivel de laboratorio son la base fundamental para el estudio y desarrollo de las propuestas tecnológicas y su escalado a nivel de Planta Piloto.
2. De las variantes tecnológicas propuestas la de mejores resultados técnico-económicos resultó ser la PreSac, bajo las condiciones estudiadas.
3. Se pueden determinar las variables de mayor incidencia en los indicadores económicos estudiados con los resultados obtenidos en el laboratorio, el uso sistemático de la simulación a través del EXCEL y una adecuada selección y diseño de los equipos.
4. La factibilidad económica en la producción de etanol de residuos lignocelulósicos solo es posible mediante la obtención de coproductos de alto valor agregado.
5. El procedimiento propuesto permite guiar la investigación científica de escalado de forma constante y decidir las mejores alternativas para lograr un diseño de una instalación industrial.
6. Los datos de propiedades de los fluidos que requieren su evaluación a nivel de Planta Piloto no están disponibles en la literatura..

## Bibliografía

- Kasatkin, A. G.: *Operaciones Básicas y Aparatos en la tecnología química*, 1971.
2. Kern, D. Q.: Procesos de transferencia de calor, 1999.
  3. Levenspiel, O.: *Ingeniería de las reacciones químicas*. 359-381, 395-441, 1974.
  4. McCabe, W.: Operaciones unitarias en ingeniería química, in mcgraw-hill (Ed.), Cuarta edición ed., 1991.
  5. Mesa, L.: "Estrategia investigativa para la tecnología de obtención de etanol y coproductos del bagazo de la caña de azúcar". Tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Técnicas, UCLV: Diciembre de 2010.
  6. Mesa, L.; E. González; M. M. Zamora; E. C. Galiano; C. Cara & V. Kafarov: Economic Evaluation of pretreatment alternatives for ethanol production from sugar cane bagasse. 17 th European Biomass Conference & Exhibition From Research to Industry and Markets, Hamburgo, Alemania, 2009.
  7. Pavlov, K. F.: Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química, 1980.
  8. Pedraza, J. & E. González: Consideración de la incertidumbre en los parámetros de diseño de los equipos, en González, E. (Editor): Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria química, fermentativa y farmacéutica, 2005.
  9. Peters, M. S. & K. D. Timmerhaus: Plant design and economics for chemical engineers. IN mcgraw-hill, I. (Ed.) Fourth Edition ed, 1991.
  10. Treybal, R. E.: Operaciones con transferencia de masa, 1986.
  11. Sáenz, T.: Ingenierización e Innovación Tecnológica, en Balladares Rodríguez, Mildred (Editor) "Tecnología y Sociedad". Editorial, Félix Varela, 1999. ISBN:959-258-075-8.