

APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PINCH EN LA INTEGRACIÓN TÉRMICA Y DE PROCESO EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL DE *IPOMOEA* *BATATAS* (CAMOTE)

PARTE I

Raymundo Erazo E., Juan Woolcott H., Marco Guerrero A., L. A. Gómez H., J. I. Díaz P.

Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Resumen

El presente trabajo tiene por finalidad desarrollar la integración térmica y de proceso aplicando la tecnología PINCH a la producción de etanol a partir de camote variedad INIA 306 Huambachero. Se presenta la primera parte, la tecnología del proceso, que consistió en una primera fase de hidrólisis de almidón con enzimas de una malta cervecera obteniéndose en un tiempo máximo de 20 minutos, seguido de la fermentación con levadura *saccharomyces cerevisiae*, obteniéndose un rendimiento de 85 a 95 litros de etanol por tonelada de camote y que representa aproximadamente un beneficio económico de hasta un 25 % en reducción de costos de producción de etanol por litro comparado con alcohol de materia prima convencional como melaza de caña de azúcar.

Palabras claves: Fermentación, etanol, camote, alcohol.

Abstract

This research has the purpose of developing thermal and process integration applying PINCH technology to the production of ethanol from sweet potato variety 306 INIA Huambachero. The first part deals with the technology of the process, which consisted in the first stage of starch hydrolysis with enzymes of brewing Malta obtaining in a maximum time of 20 minutes, followed the fermentation with yeast *saccharomyces cerevisiae* obtaining a yield of 85 to 95 liters of ethanol for ton of sweet potato which represents an economic benefit of approximately 25 % compared to the production costs of ethanol obtained with conventional methods using sugar cane molasses.

Keywords: Fermentation, ethanol, sweet potato, alcohol.

I. INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas pasadas, el análisis PINCH ha pasado de ser una herramienta aplicada para mejorar la eficiencia energética en el diseño de nuevos procesos o en el análisis de procesos en operación, a una metodología ampliamente utilizada en la optimización de tales procesos. Así por ejemplo, en la década de los 90 del siglo pasado ya se reportaron importantes logros por el uso de esta tecnología como Union Carbide que logró ahorros promedios del 50 % en los costos energéticos para plantas nuevas y periodos de recuperación de la inversión de seis meses en proyectos de rediseños de plantas en operación.

Por otro lado, Shell también hizo público sus resultados logrados en un complejo de

refinación en Holanda de una disminución global del 40 % en el consumo de energía y del 75 % en las emisiones líquidas contaminantes. En general, todas aquellas compañías que han logrado éxito, declaran que sin esta tecnología de análisis no hubiera sido posible identificar, ni mucho menos materializar, el potencial de mejoras existentes.

La planta piloto de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos cuenta en sus instalaciones con un módulo piloto para producción de etanol de 96 % v/v el cual será utilizado para el presente estudio que tiene por objeto desarrollar la integración térmica y de proceso en la producción de etanol a partir de camote, así como evaluar los parámetros técnico, económico y ambiental En esta primera

parte presentamos la base tecnológica del proceso de etanol de camote a escala banco.

II. MARCO TEÓRICO

Camote (*Ipomoea batatas*)

Pertenece a la familia de las convolvuláceas y su parte carnosa se constituye por ramas subterráneas a diferencia de la papa, o patata, que es una solanácea cuyos frutos son los tubérculos. Dado la variedad de camote, el lugar y las condiciones de cultivo, la composición química es variada, sin embargo, una composición promedio se da en la tabla N° 1.

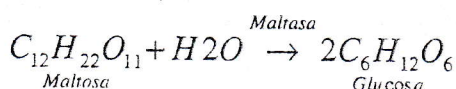
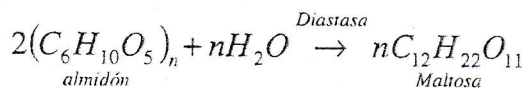
Tabla N° 1. Composición química promedio de camote.

Componentes	Composición promedio, % peso
Agua	68,50
Sustancias proteicas	2,90
Compuestos no nitrogenados	27,80
Cenizas	0,80

Los compuestos no nitrogenados están constituidos por aproximadamente 16 % de almidón, 6 % de sacarosa y 5,8 de celulosa, grasas, etc.

Hidrólisis

Comprende la transformación del almidón o celulosa en glucosa fermentescible. Esto es debido a que la levadura al no contener amilasa, no es capaz de fermentar el almidón, y se puede realizar por dos vías: Uno químico, hidrólisis ácida, por ejemplo con ácido clorhídrico y bajo presión; y la otra vía biológica, enzimático, obtenidas por ejemplo de granos de cereales germinados o por fermentación con microorganismos, por ejemplo *Mucor*, y purificados, presentando un gran poder sacarificante. A continuación se dan las reacciones más importantes de la sacarificación de almidón.

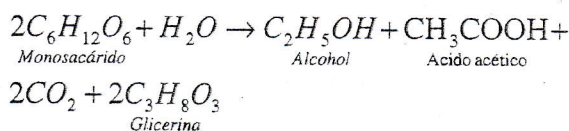
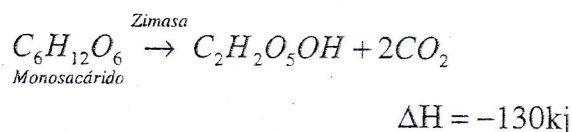


Se deben tomar en cuenta los análisis de sacarificación de almidón por procesos enzimáticos, debido que los procesos ácidos

transforman las pentosas en sustancias reductoras, separándose el almidón en dos componentes uno de ellos es soluble en agua amilasa (20%) y otro insoluble la amilopectina (80%) que se pueden hidrolizar a maltosa.

Fermentación

Algunos factores básicos de fermentación son el pH, la temperatura, la aireación, agitación, la fermentación como cultivo puro y la uniformidad del rendimiento. Para obtener el rendimiento máximo del rendimiento químico deseado, a veces es aconsejable suprimir la multiplicación del microorganismo. La importancia de esto puede advertirse si se sabe que para obtener un gramo de levadura (base seca) se necesitan 1,5 a 2,0 gramos de monosacáridos al día y 6 gramos para mantenerlo. Incluso el alcohol formado por las levaduras llega al fin a una concentración (2 al 15% dependiendo de la levadura) que suprimirá la actividad del organismo y sus enzimas. Las reacciones de fermentación simplificadas se muestran a continuación:



Probablemente el primer paso sea la formación del éster fosfato de hexosa, seguido por una división en la cadena de seis carbonos. El aceite de fusel (una mezcla de alcoholes amílicos con algo de alcoholes propil, butil y hexílicos y ésteres), que llegan a ser 3 a 11 partes por 1000 partes de alcohol obtenido de fermentación con levadura, proviene según se cree, de las proteínas presentes en la masa fermentada.

El pH, inicial se ajusta entre 4,8 a 5,5. La fermentación es exotérmica, y puede ser necesario enfriar para mantener la temperatura en 30 °C aproximadamente. El tiempo de fermentación está entre 14 a 18 horas.

En la fermentación alcohólica y trabajando con levaduras corrientes, al alcanzar una concentración de 9% se observa una disminución celular. Esto es debido a la acción depresiva del alcohol etílico que detiene por completo la

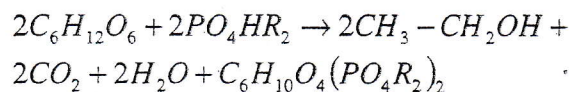
fermentación. En la tabla N° 2 se dan algunos valores de las constantes de inhibición que presenta algunos alcoholes con relación a la ejercida por el alcohol etílico.

Tabla N° 2. Constantes de inhibición de algunos alcoholes frente al alcohol etílico.

Alcohol	Constante de inhibición
Metílico	0,49
Etílico	1,00
Propílico normal	20,1
Iso propílico	1,49
Butílico normal	7,60
Iso butílico	7,32
Amílico normal	33,70
Isoamílico	29,00
β feniletílico	41,70
Tirexol	5,40
Etilenglicol	0,43
Glicerina	0,61

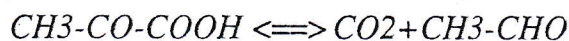
Los compuestos de cadena normal son generalmente más tóxicos que sus isómeros ramificados y la introducción de un grupo OH en la molécula hace disminuir sensiblemente la toxicidad.

Wroblewski y Bughner observaron que por cada molécula de fosfato presente en el medio, se produce una molécula de fosfato, se produce una molécula más de CO₂ y de R-OH que otra fermentación a la cual no se añade fosfato.



Este difosfato de hexosa es un intermediario importante de los esquemas de Embden, Meyerhof en el desdoblamiento de los hidratos de carbono. En efecto, todas las levaduras que fermentan la glucosa fermentan también la fructuosa y la manosa, suponiendo que los tres azúcares tienen una única forma enólica, por el cual son fermentados por las levaduras tal como se observa en la figura N° 1.

Según Neuberg y Coll encontraron que la descomposición se hacía mediante la actividad de una enzima contenida en la célula de levadura, a la cual, por su acción sobre el carboxilo, la denominaron carboxilasa, esto explica el origen del CO₂ en la fermentación.



Un esquema del proceso de fermentación y la serie de reacciones que se practican cuando se trata de maltosa, proveniente del almidón, es como sigue:

1. Maltosa (glucosa + glucosa)
2. Hidrato de carbono de grandes moléculas (n moléculas de glucosa)
3. (1 + 2) moléculas de glucosa libre + 1 hidrato de carbono de grandes moléculas, compuesto de n+1 restos de glucosa.
4. La materia anterior (3) se descompone en fosforilasa en 1 molécula de glucosa libre + un éster de ácido fosfórico de 2.

Las enzimas que se necesitan son:

Sacromilasa que tiene por efecto que (1 y 2) reaccionen.

Fosforilasa: que disocia la materia.
Fosfatos: que retira el ácido fosfórico de la materia (3) para que la materia (2) se produzca y todo el proceso vuelva a comenzar.

Si se prepara la maltasa a base de levadura, se ve que esta maltasa tiene un pH óptimo de 6,8, si por lo contrario se prepara a un pH de 4,5, se tiene una maltasa prácticamente inactiva, si es una levadura ácida puede fermentar la maltosa a 4,5 de pH. La fermentación con levadura de cerveza requiere una hidrólisis preliminar por medio de la maltasa.

La fermentación de 100 partes de sacarosa se origina primeramente 105,4 partes de azúcar invertida las que a su vez, mediante la fermentación, producen 51,1 partes de alcohol etílico, 49,4 partes de CO₂, 3,2 partes de glicerina, 0,7 partes de ácido succínico y 1 parte de otras sustancias.

Análisis PINCH

La integración térmica se desarrolla aplicando las herramientas del análisis PINCH tomando en consideración el diagrama de flujo del proceso en donde se identificarán las corrientes del proceso que son fuentes y los sumideros. Para esto es necesario en primer lugar desarrollar el diagrama de flujo del proceso continuo para determinar el punto de división del proceso (punto PINCH). Esto conduce a una red de transferencia de calor de costos mínimos, por cuanto los requerimientos y remoción de calor desde el proceso obedecen a flujos mínimos.

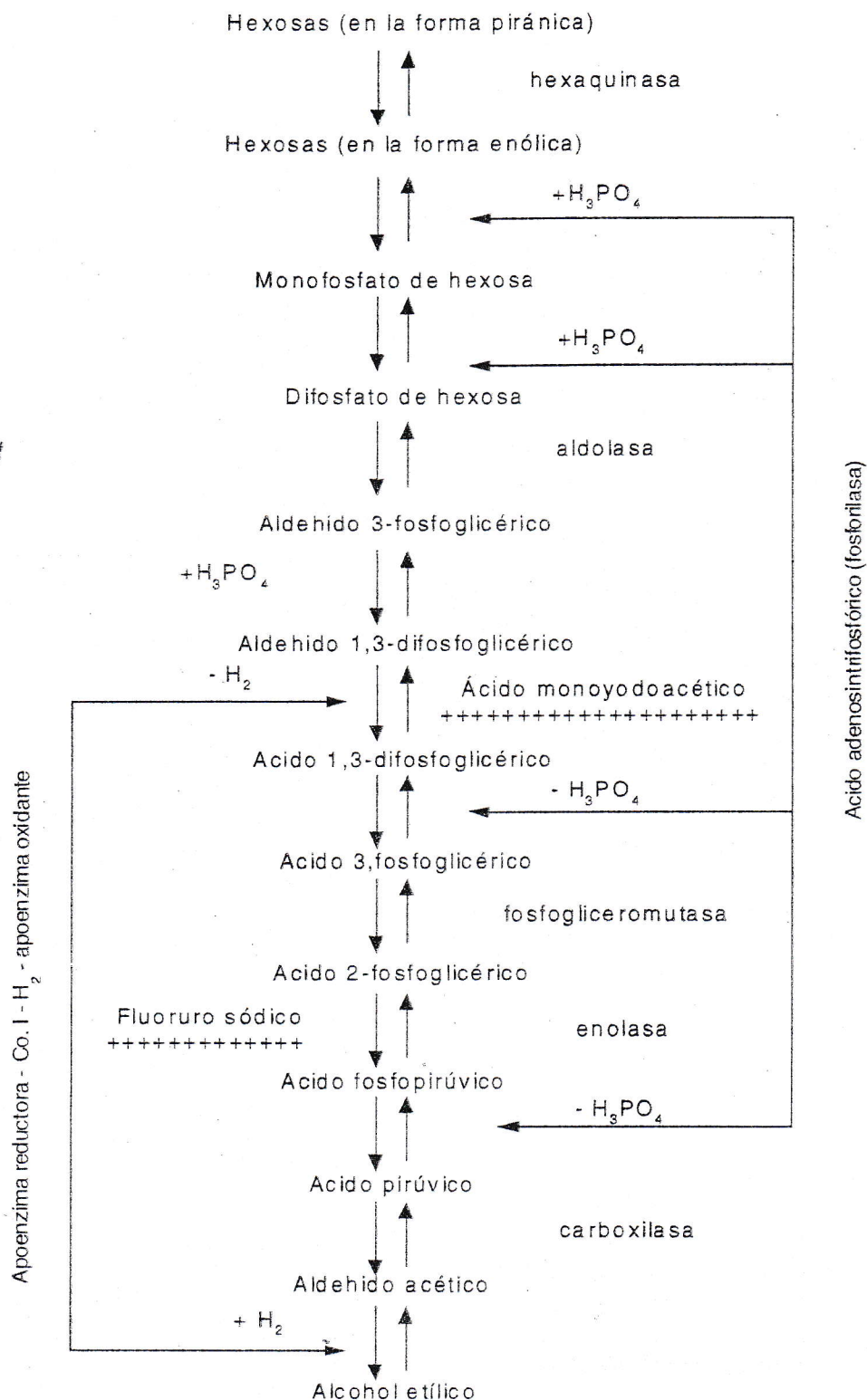


Figura N° 1. Esquema General de la fermentación alcohólica (Fuente: Palacios Llamas, H).

Las herramientas para la integración de servicios son la curva compuesta y la gran curva compuesta. La gran curva compuesta se construye a partir del balance de calor entre las corrientes del proceso en diferentes intervalos de temperatura y se considera que el calor puede aprovecharse internamente al

fluir en cascada de un intervalo con exceso de calor (balance de entalpía positivo) a otro intervalo con requerimiento de calor (balance de entalpía negativo) a temperatura inferior. Lo correspondiente a este parte del trabajo será presentado en el siguiente número de la revista.

III. MÉTODOS Y RESULTADOS

Materia prima

Para el desarrollo del proyecto primero se ha tenido que seleccionar la materia prima por la gran variedad de camotes en el país con diferentes composiciones en almidón fundamentalmente. En el Instituto Nacional de Investigación Agraria INIA, han desarrollado una variedad camote INIA 306 Huambachero, de alto rendimiento en almidón, razón por la cual hemos seleccionado tal variedad de camote como materia prima para el presente trabajo.

Siguiendo los procedimientos estandarizados en AOAC³ para los diferentes análisis físico químicos de la materia prima se han obtenido los resultados de la tabla N° 3.

Tabla N° 3. Composición fisicoquímica de camote.

Composición	Porcentaje
Humedad	65 – 68 %
Azúcares iniciales	4 – 6 %
Almidón	18 – 19 %
Azúcares totales	18 – 21 %

Extracción de las enzimas de la malta.

Se pesa la malta en proporción de 0.1 kg. de malta/Kg. Camote, y se realiza la molienda seguidamente. Se agrega agua desionizada con un pH neutro en una proporción de 2 a 2.5 Kg. de agua/ Kg. malta; mezclando y diluyendo la malta. Luego, se lleva a calentamiento lento controlando tiempo y temperatura de la infusión:

- a 45 °C durante 20 minutos
- a 50 °C durante 15 minutos
- a 55 °C durante 15 minutos
- a 60 °C durante 20 minutos

Seguidamente se procede a la medición del pH. (5.3 aprox.), y posteriormente se deja reposar la infusión durante un intervalo de 2 a 12 horas para la hidrólisis de camote.

Hidrólisis

Se extrae el almidón haciendo hervir el camote en relación de 2 Kg de agua/Kg. de camote durante 180 minutos produciéndose una primera hidrólisis térmica. Se procede a la trituration del camote y paso a través de malla de 1mm. Se lleva a calentamiento a 45 °C y se

agrega las enzimas previamente extraídas. Se prosigue aumentando la temperatura a 50 °C. por un período de 5 minutos y se realiza un seguimiento cualitativo de contenido de almidón mediante la prueba de yodo, mediante la coloración de azul intenso a amarillo según los valores aproximados de tiempo y coloración tal como se muestra en la tabla N° 4.

Tabla N° 4. Control de tiempo por prueba de yodo en la hidrólisis.

Tiempo de sacarificación (min.)	Coloración prueba de Yodo
0	Azul intenso
5	Morado
10	Violáceo
15	Rosado
20	Amarillo

Este proceso también es seguido de un aumento de temperatura desde un rango aproximado de 45 a 70 °C según se muestra en la tabla N° 5.

Tabla N° 5. Control de tiempo y temperatura por prueba de yodo en la hidrólisis.

Temperatura (°C)	Tiempo de sacarificación (min.)	Coloración prueba de Yodo
45	0	Azul intenso
50	5	Morado
55	10	Violáceo
60	15	Rosado
70	20	Amarillo

Se procede a las medición del pH de la infusión estando alrededor de 5 – 4,9 y un rango de sólidos totales correspondiente de 19,6 a 21 °Brix.

Fermentación

Las escalas de trabajo fueron laboratorio y banco. Se prepara el fermentador desinfectándolo con lejía y lavado con agua caliente a 70 °C, igualmente los accesorios y aditamentos respectivos. Se prepara el cultivo para la fermentación llevándolo hasta 32 °C y un pH de 4.5 a 4.7. Se inocula este cultivo al mosto previamente hidrolizado mediante una agitación lenta en el fermentador. Tanto el pH como la temperatura de fermentación está entre 30 a 32 °C el cual es conducido en una cámara de incubación a una temperatura de 32 – 35 °C. Se procede a una toma de azúcares

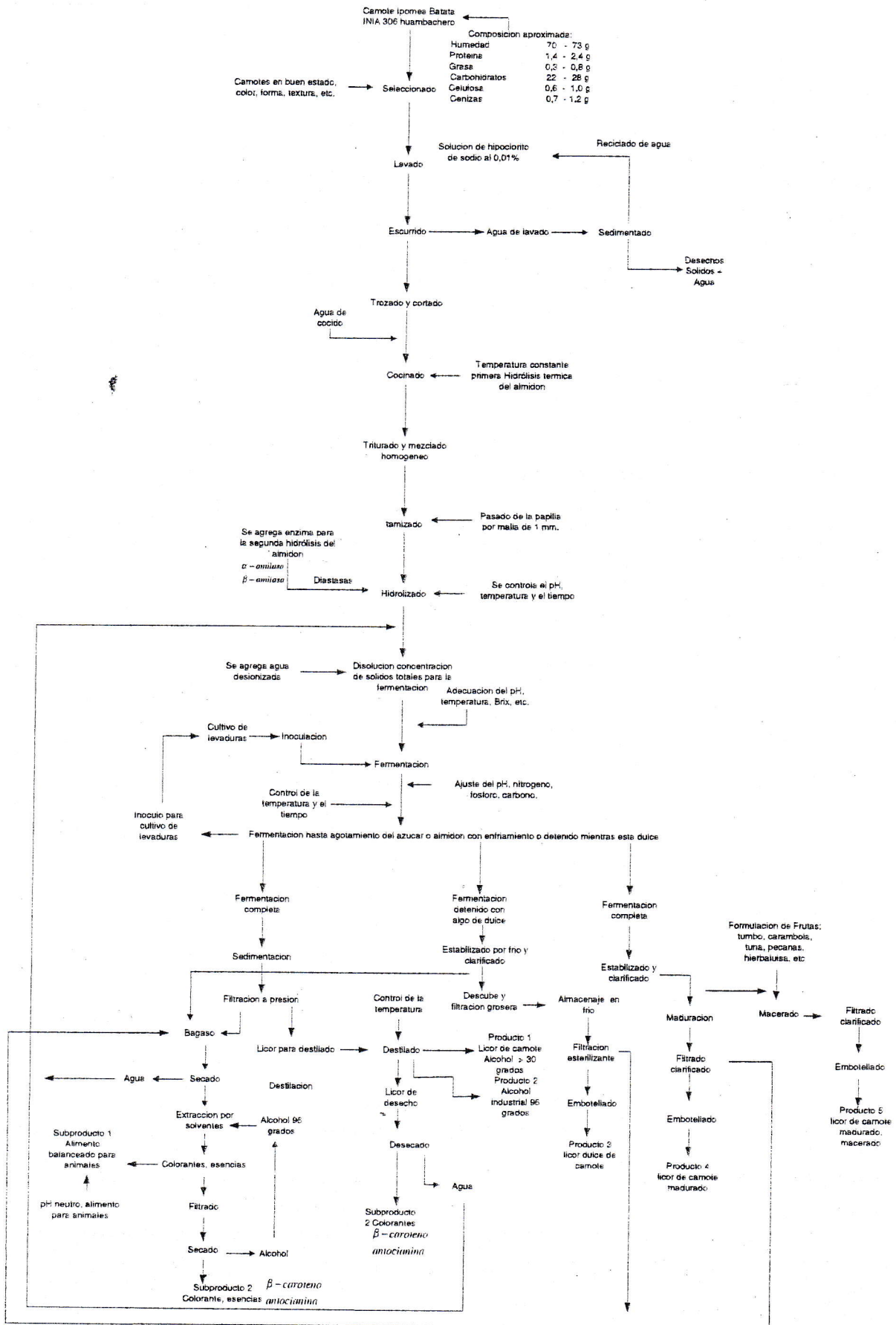


Figura N° 2. Procedimiento experimental de producción de etanol de camote.

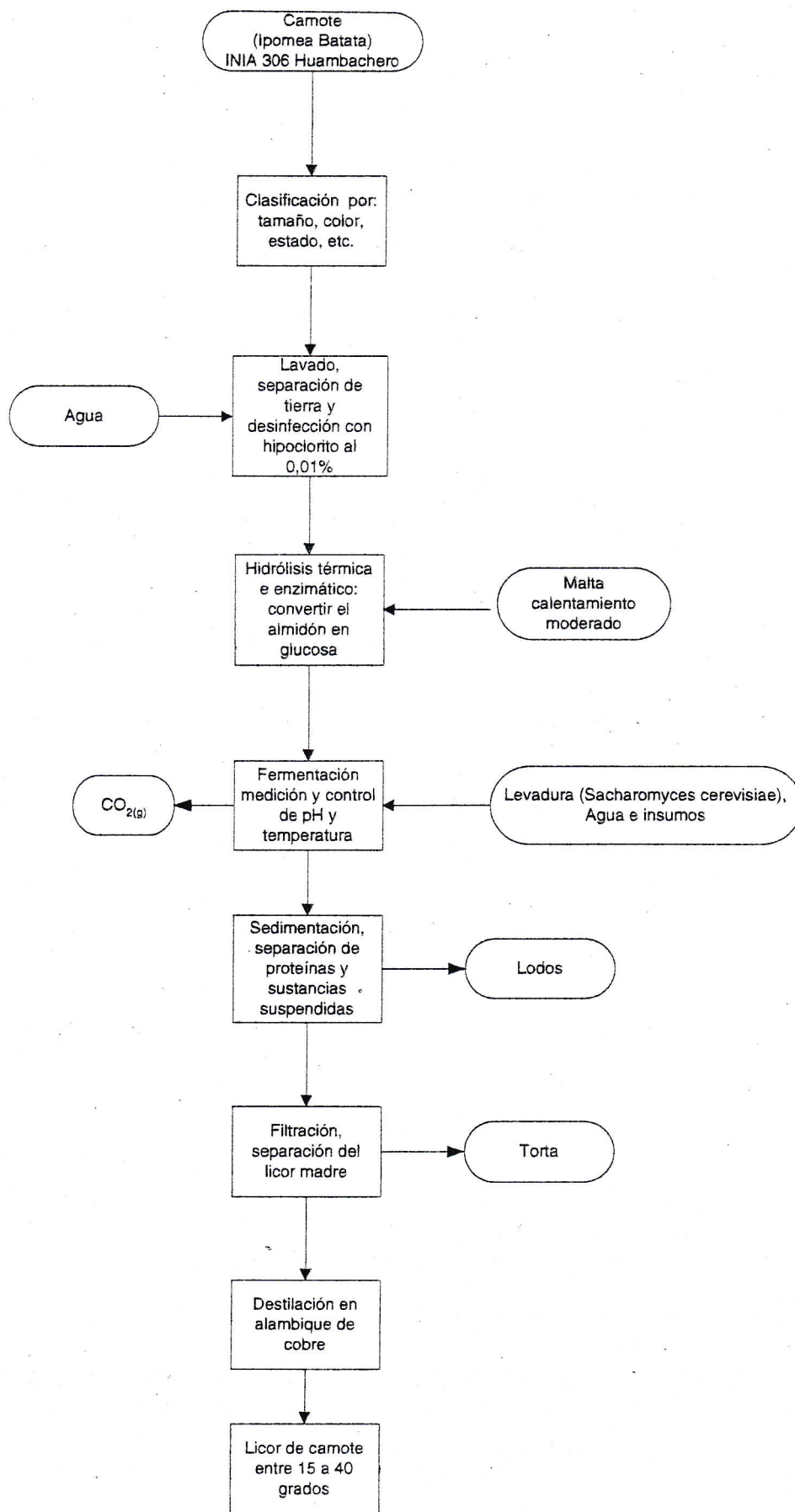


Figura N° 3. Diagrama de bloques de producción de etanol de camote.

totales inicial para control de proceso y durante 14 horas siguientes. Por otro lado, el cultivo con levadura (*saccharomyces cerevisiae*) se formuló como se muestra en la tabla N° 6.

Tabla N° 6. Formulación de medio nutricional para cultivo de levadura s. c.

Insumo	Porcentaje
Levadura	1.30%
Nitrato de amonio	0,75 %
Ácido fosfórico	0.05 % - 0.005 % (de acuerdo al pH)
Camote hidrolizado	100 a 200 mL.

La fermentación se realizó desde 10 hasta 22 °Brix de sólidos totales iniciales, encontrándose que los mejores resultados se obtuvieron trabajando a 16 °Brix inicial. Se usaron tanques de fermentación anaeróbicos de vidrio a una temperatura de incubación exterior de 32 a 35 °C por un período de 14 a 20 horas, durante lo cual se toma muestras de 60 mL cada hora para análisis.

Se determina el % v/v de alcohol producido con el alcoholímetro de Malligand. Los sólidos solubles totales se mide con el refractómetro de Abbe. Los controles de pH se realizaron con un medidor de pH digital con una precisión de 0.01. Se obtuvieron rendimientos de hidrólisis – fermentación entre 85 a 95 litros de alcohol por tonelada de camote. El procedimiento experimental se muestra en la figura N° 2.

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La selección de variedad de camote fue el primer paso importante en el trabajo. El camote INIA 306 Huambachero, reúne los requisitos por cuanto su contenido en materia seca entre 30 a 35 % y su contenido de almidón de 18 % representa una ventaja frente a las demás variedades conocidas. Sin embargo, no está en discusión aquí que si es la especie recomendada para siembra y cultivo, por cuanto su rendimiento está en 35 toneladas por hectárea frente a otras variedades que llegan hasta 45 toneladas por hectárea que podrían competir con el camote huambachero como materia prima.

Nuestros resultados mostrados en la tabla N° 3, guarda un acuerdo con los proporcionados por el INIA respecto de las características de esta variedad de camote. Esto nos ha permitido obtener una base de datos para una evaluación

económica posterior respecto del diseño de la planta de producción de alcohol motor, cual es el objetivo siguiente de este trabajo.

La hidrólisis del contenido de almidón de camote se realizó por el procedimiento enzimático, para lo cual se utilizó una malta pilsen Argentina (CARGILL) de Biofarma SA, cuyo poder diastásico (DP) es 110 – 160 ° lintner (385 – 520 °WK), obteniéndose los resultados mostrados en las tablas N° 4 y 5, los cuales nos permite deducir su gran calidad puesto que el tiempo total de hidrólisis está entre 15 a 20 minutos, lo que va a significar un ahorro de costos importante a escala comercial.

La fermentación por otro lado, se desarrolló dentro del procedimiento convencional de fermentación alcohólica cuyos rangos de temperatura y pH fueron de 30 a 32 °C y 4.5 a 5, respectivamente. El tiempo de fermentación fue de 14 a 20 horas, debido a factores de carácter ambiental, así también se han obtenido rendimientos en un rango de 85 a 95 litros de alcohol por tonelada de camote considerando que con las condiciones de equipamiento y equipos de control y medición disponibles, estos resultados son muy buenos y concuerdan con resultados publicados en la literatura sobre alcohol de materia prima similar. En la figura N° 3 mostramos un diagrama de bloque para la producción de etanol de camote. el mismo que será la base para el diagrama de flujo de este proceso para la aplicación del análisis PINCH que sereá presentado en una siguiente publicación.

V. CONCLUSIONES

La selección de materia prima constituye el primer paso importante en el diseño del proceso, el camote INIA 306 Huambachero, representa esta mejor alternativa por cuanto su alto contenido en materia seca y almidón condicionan un proceso más económico.

La hidrólisis de almidón de camote INIA 306 Huambachero se logró en un tiempo no mayor de 20 minutos utilizando una malta apropiada de las características señaladas. Esto nos permite concluir que representa un beneficio en el análisis global de producción de alcohol de camote por cuanto se prevé una reducción significativa en los costos de proceso.

En la fermentación se logró, con los controles apropiados de temperatura y pH, obtener un resultado dentro de los rangos publicados en

la literatura, el rendimiento de 85 a 95 litros de alcohol por tonelada de camote a un costo aproximado de 1.20 soles por litro, representa una alternativa competitiva frente a alcohol de melaza de costo aproximado 1.60 soles por litro.

VI. AGRADECIMIENTO

Al Consejo Superior de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el financiamiento económico en la realización del presente proyecto de investigación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Palacios Li. H., *Fabricación de Alcohol*, Rd. Salvat Editores SA. Barcelona, (1956).
2. Kira R. S., Sawyer R. y Egan H., *Composición y Análisis de Alimentos de Pearson*, Ed. CECOSA. México, (2000).
3. AOAC INTERNATIONAL, *Official Method*, (1998).
4. Atkinson B., *Biochemical Reactors*, Pion Limited, London, (1974).
5. Levenspiel, O. *Chemical Reaction Engineering*, John Wiley, London, (1972).
6. López A. B. y otros, Proceso de Fabricación del Bioetanol I, II y III. *Rev. Ing. Quím. Esp.*, Julio/setiembre, (2002).
7. Zunin, G. M. y otros. Brazilian Bioethanol Program, *Appl. Biochem & Biotechnol*, (2000).
8. Sarkkinen K. Technology for Bioethanol Production from Different Raw Materials, *Adv. Alcohol Fuels World*, Vol. 12. 81, (1999)
9. Dorán P. M. *Principios de Ingeniería de los Bioprocesos*, Ed. Acribia, Madrid, (1996).
10. Bailey J. and Ollas D. F., *Biochemical Engineering Fundamentals*. Ed. Mc Graw Hill Book Company, (1986).
11. Polley G. T. and Amidpour M., Structural Targeting the Better Way To Heat Exchanger Network Retrofits, *Chem. Eng Prog.*, January, (2001)
12. Nishida N. et. Al., A Review of Process Synthesis, *AIChE Journal* 27 (3).321, (1981).
13. Plants Ch. A., Evaluate Heat Exchanger Performance. *Chem. Eng.*, July, 104, (1992).
14. Polley G. T., Maximize Fuel Efficiency of Cogeneration Systems, *Chem. Eng. Prog.* August, (2000).