



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

6
2ej

APLICACION DEL SECADO POR ASPERSION
PARA LA OBTENCION DE EXTRACTO
DE YUCA EN POLVO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A N :
**VICTOR MANUEL ESCAMILLA PEREZ
PABLO RAMON ORTIZ RAMOS
EDUARDO VEGA CHAVEZ**

ASESOR:
DR. JOSE LUIS ARJONAROMAN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN, A.M.
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Aplicación del Secado por Aspersión para la
Obtención de Extracto de Yucca en Polvo

que presenta el pasante: Victor Manuel Escamilla Pérez
con número de cuenta: P43065249 para obtener el TITULO de
Ingeniero en Alimentos ; en colaboración con:
Cristóbal Ramos Pablo Ramón y Vega Chávez Eduardo

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautilán Izcalli, Edo. de Mex., a 9 de Mayo de 1996

PRESIDENTE M. en C. Ma. Elena Vargas Ugalde

VOCAL I.O. Gerardo García Ibarra

SECRETARIO Dr. José Luis Arjona Román

PRIMER SUPLENTE I.A. Rosalva Meléndez Pérez

SEGUNDO SUPLENTE Ilgen C. Ricardo P. Hernández García



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN, A. M.
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN
P R E S E N T E .

AT'NI Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Aplicación del Secado por Aspersión para la
Obtención de Extracto de Yuca en Polvo

que presenta el pasante: Victor Manuel Escamilla Pérez
con número de cuenta: 14336624 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniero en Alimentos; en colaboración con:
Cristóbal Ramos Pablo Roca y Vega Chávez Eduardo

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 9 de Mayo de 1996

PRESIDENTE M. en C. Elena Vargas Ugalde

VOCAL I. C. Oscar García Ibarra

SECRETARIO Dr. José Luis Arjona Román

PRIMER SUPLENTE I. A. Rosalba Meléndez Pérez

SEGUNDO SUPLENTE I. C. Ricardo P. Hernández García



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de
Exámenes Profesionales

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Aplicación del Secado por Aspersión para la Obtención de
Extracto de Yuca en Polvo.

que presenta el pasante: Pablo Ramón Ortiz Ramos

con número de cuenta: BR07111-8 para obtener el TITULO de:

Ingeniero en Alimentos ; en colaboración con :

Escamilla Pérez Víctor Manuel y Vega Chávez Eduardo

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 9 de Mayo de 1996

PRESIDENTE	M.en C. Ma. Elena Vargas Ugaldé	
VOCAL	L.O. Oscar Germán Ibarra	
SECRETARIO	Dr. José Luis Arlona Román	
PRIMER SUPLENTE	I.A. Rosalva Meléndez Pérez	
SEGUNDO SUPLENTE	M.en C. Ricardo P. Hernández García	



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de
Exámenes Profesionales

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Calificación del Segundo por Ejecución para la Obtención
de Extracto de Yuca en Polvo.

que presenta el pasante: Eduardo Vega Chávez
con número de cuenta: 8808548-7 para obtener el TITULO de:
Ingeniero en Alimentos ; en colaboración con :

Escuella Pérez Victor Manuel y Ortiz Ramos Pablo Ramón

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 9 de Mayo de 1996

PRESIDENTE M. en C. Ma. Elena Vargas Ugaldé

VOCAL I. Q. Osacar Germán Ibarra

SECRETARIO Dr. José Luis Arjona Román

PRIMER SUPLENTE I. A. Rosalía Meléndez Pérez

SEGUNDO SUPLENTE M. en C. Ricardo P. Hernández García

Gracias al Dr. José Luis Arjona Román, por dirigirnos en este proyecto. Por su valiosa persona, por actuar con sabiduría al hacernos ver nuestros errores y aciertos.

Gracias a la Ing. Rosalía Meléndez Pérez, por su invaluable apoyo en las asesorías y facilidades otorgadas durante y para el desarrollo del proyecto.

Gracias a la Ing. Ma. de la Luz Zambrano Z., por su importante contribución al permitirnos su tiempo en asesorías técnicas y prácticas del desarrollo experimental de las pruebas de higroscopicidad; asimismo agradecemos a las personas involucradas en tales procedimientos.

Gracias al Ing. Jaime Flores M., por su incondicional apoyo en aportaciones importantes para el desarrollo del proyecto.

Gracias a todos los profesores quienes a lo largo de esta preparación profesional intervinieron de una u otra manera en nuestro desarrollo académico-profesional.

De todos ustedes hemos aprendido que:

" EN LA VIDA SÓLO HAY DOS COSAS: RESULTADOS Y PRETEXTOS. Y LOS PRETEXTOS NO VALEN".

Lo ideal sería obtener siempre los mejores resultados, éste que aquí tienen pensamos que es el mejor resultado de la preparación guiada por ustedes.

También quisiéramos agradecer a las personas que sin ningún interés nos han apoyado: Ing. Jorge Herrera L. (ARANCIA S.A. de C.V.), Ing. Rocio Aparicio (Gomas Naturales S.A. de C.V.), Ing. Hugo Carreño O., e Ing. Lucía Cuevas (TAKASAGO de México S.A. de C.V.).

Gracias a Dios por haberme puesto en el camino, con la fuerza necesaria para alcanzar mis objetivos.

Gracias a mis Padres por haber sido el motivo y la inspiración de todas mis acciones.

Gracias a mis Tios por todo su apoyo y paciencia, que a lo largo de este tiempo he recibido.

Gracias a mis Hermanos y Primos por su compañía, por los buenos ratos, por las alegrías.

Gracias a todos les doy con AMOR, por que por ustedes he logrado realizar una de mis más grandes aspiraciones; al presentar este trabajo y dedicarselos como una pequeña retribución por todo lo que me han dado, durante los años en los que me han permitido compartir sus vidas.

Gracias por estar conmigo.

**Sinceramente
Pablo.**

A Dios, porque creo en ti y por permitirte vivir en este mundo, en este momento.

A mis abuelos paternos y maternos, quienes no sólo me proporcionaron infinidad de veces su tiempo, sus cuidados, sus consejos; si no que también me otorgaron los mejores padres del mundo.

A la memoria de mis abuelos: Gelacio Vega Vega (q.e.p.d.) y Porfiria Guerrero de Vega (q.e.p.d.), porque donde se encuentren, se que estarán siempre muy orgullosos de mí.

A mis padres, por darme la vida y poner en todo momento su esfuerzo por mantenerme en el camino correcto; por darme la mejor herencia que un hijo puede recibir: la oportunidad de estudiar y prepararse para la vida. Porque con su incondicional apoyo me han educado con los mejores ejemplos: ser buen hijo y buen hermano para ser buen padre, saber dar amor para poder recibir amor. Y sobre todo, saber apreciar todo aquello que tiene su precio o que cuesta trabajo conseguir, como lo es una familia.

A mis hermanos y hermanas, por ser como son y ojalá que nunca cambien conmigo, porque he recibido de ustedes cosas muy valiosas, he aprendido tanto del mayor como del más pequeño.

A mi esposa, por tener la sabiduría de la mujer que es compañera, confidente, amante, madre y esposa. Por todos los momentos de alegrías y desavenencias que hemos pasado juntos en estos tiempos.

A mis hijos, Eduardo y Enrique, porque ustedes son la parte principal y más importante para mí inspiración en la vida, por ser la fuente que emana toda la potencia y fuerza que necesito en mis momentos de debilidad. También aprendo mucho de ustedes a ser mejor cada día.

A mis suegros, por ser como otros padres para mí. También, a mis cuñados y cuñadas, porque su apoyo sin otro interés que el verme desarrollado profesionalmente y como persona, me impulsa a seguir adelante con mis aspiraciones por el bienestar de mi familia que asimismo son ustedes.

A mis tíos, tías, primos y primas, en general considero que soy una persona muy afortunada por estar rodeado de personas con gran CALIDAD HUMANA, el respaldo y el ánimo que me daban se ve ahora cristalizado en este pequeño gran paso en mi vida.

Quisiera agradecerles y dedicarles la culminación de uno de mis más grandes objetivos.

Sinceramente:

Eduardo.

En esta Tesis he puesto lo mejor de mi por ello con orgullo lo dedico a :

La memoria de mis abuelitas y mis abuelitos (q.e.p.d.), que siempre estarán en mi corazón y en mi mente se los prometí y lo cumplí , se que estarán orgullosos de su nieto.

A mis padres que no solo les debo la vida sino también que gracias a su apoyo en todo momento me alentaron a continuar hasta alcanzar el que hoy es el máximo de mis objetivos.

Mama gracias por haber confiado siempre en mí , con tu dedicación , cariño y sobre todo tus consejos siempre tan acertados me guiaron hacia el camino del éxito, te adoro mamá.

Papa espero que estés orgulloso , ves al final no te falle y lo conseguí , gracias por apoyarme y siempre estar conmigo , te quiero mucho.

A mis hermanos Blanca Aurora y Francisco Alejandro , gracias por su comprensión , por soportarme con todo y mi carácter , quiero que toda la vida seamos como hasta ahora muy unidos y apoyamos como siempre en todo , los quiero mucho.

A la familia Caballero Escamilla , Jaime , Blanca y mi sobrina Brenda Aurora que tanto adoro y que a todos en casa nos ha conquistado y revolucionado.

A la familia Pérez Trujillo que durante todo este tiempo que hemos convivido siempre me han hecho sentir como de la familia, gracias .

A mi novia Ana Luisa , que con su amor y su ternura me ha enseñado a encontrar la armonía y equilibrio para vivir feliz y enamorado , Anni eres la mujer de mi vida , te amo.

A la Escuela Cristóbal Colon en especial a los hermanos La Sallistas que cimentaron junto con mis padres los valores que siempre me conducen.

A la UNAM , que tanto le debo.

Y a todos aquellos que de una y otra forma me apoyaron para alcanzar esta gran meta.

Con todo mi cariño y agradecimiento:

Victor Manuel Escamilla Pérez

INTRODUCCION:

La deshidratación ha sido utilizada a través de la historia por el hombre para, entre otros principios, incrementar el período de vida útil de los alimentos perecederos; hasta hoy se ha considerado al agua como el componente más dominante de los alimentos comunes, proporcionando un factor crítico de desarrollo necesario para los procesos biológicos, bioquímicos y biofísicos que degradan los productos comestibles, haciéndolos no aptos para el consumo humano. Cualquier reducción del contenido de agua que retarde o inhíba tales procesos podría ser catalogada como una operación de preservación.(44)

El secado es un principio de preservación de alimentos, que consiste en la disminución del contenido de humedad por contacto con aire caliente y ha sido objeto de avances tecnológicos en la industria alimentaria. Debido a los bajos costos de almacenamiento y transporte asociados con la reducción de peso y volumen por el agua removida, se han podido crear incentivos adicionales que hacen de esta una de las operaciones más usadas dentro de los procesos de deshidratación.

El secado por aspersión es una rama de este procedimiento aplicable a productos líquidos, bombeables y por lo general sensibles al calor. Tiene como principio crear el contacto entre una nube asperjada de la alimentación y una corriente de aire caliente que logren tiempos de secado instantáneos obteniéndose de esta manera una acumulación de partículas deshidratadas en forma de polvo, que requiere, para su aplicación completa, de una serie de pruebas previas que establezcan las condiciones necesarias a las cuales se habrá de secar cierto producto.

En el presente trabajo se plantea realizar el secado de extracto de yuca a diferentes concentraciones, para encontrar aquellas que resulten ser las condiciones más aceptables, mediante la evaluación de los atributos de los polvos resultantes y la optimización de las variables del proceso en atención al empleo de la ingeniería de calidad. Cabe mencionar, que el producto deshidratado de extracto de yuca se ha obtenido solamente aplicando secado por congelación, esto incrementa los costos del producto al ser necesaria su importación de los países que cuentan con esta tecnología; la aplicación del secado por aspersión es innovadora para obtener el producto deshidratado con un menor costo, debido a que esta tecnología existe en el país.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar las condiciones adecuadas para el secado por aspersión, a nivel planta piloto, de extracto de yuca a diferentes contenidos de grados Brix, mediante la planeación de etapas experimentales basadas en criterios de operación, ingeniería de calidad y características (atributos) obtenidos en el polvo.

OBJETIVO PARTICULAR 1:

Planeación de la etapa preliminar, para seleccionar las condiciones de proceso adecuadas, mediante los criterios establecidos.

OBJETIVO PARTICULAR 2:

Evaluación de las condiciones seleccionadas en la etapa preliminar, mediante los atributos de polvos y apoyo en los balances de energía y materia.

OBJETIVO PARTICULAR 3:

Determinar el número de corridas definitivas para el secado por aspersión de extracto de yuca a diferentes grados Brix, mediante la ingeniería de calidad, diseñando los arreglos ortogonales en dos niveles de variación de las condiciones evaluadas como las adecuadas en la etapa preliminar.

OBJETIVO PARTICULAR 4:

Evaluar las condiciones a seleccionar como óptimas - en base a los atributos de los polvos, características dinámicas y costos del proceso - a través de la etapa confirmatoria para contrastar los valores estimados por las ecuaciones de predicción.

RESUMEN

Con el fin de establecer condiciones adecuadas para el secado por aspersión en co-corriente de aire, del extracto de yuca a diferentes contenidos de sólidos solubles (14.5 ° y 36 ° Brix), se realizó un estudio basado en una estructura de etapas experimentales que condujeron a la reducción de las posibles combinaciones de las variables de operación importantes para evaluar su efecto e influencia sobre las características de calidad más comunes del producto en polvo. Los experimentos se llevaron a cabo en un equipo de planta piloto de la compañía Niro Atomizer, ubicado en la nave 2000 de Ingeniería en Alimentos.

En general, las condiciones que cumplen con los criterios establecidos son: Mantener la velocidad máxima de 24,000 r.p.m. en el disco atomizador; un flujo de 17-20 m/s del aire, para obtener un gasto de 1200-1500 Kg. de aire seco/ hr; una temperatura de entrada de 230 ° C; y la adición de coadyuvantes de secado.

Se encontraron finalmente las siguientes condiciones como adecuadas:

- Extracto de 14.5 ° Brix:

T.ent. = 230 ° C

T.sal. = 120 ° C

Maltodextrina = 8% en peso.

Spray Gum "C" = 2% en peso.

- Extracto de 36 ° Brix:

T.ent. = 230 ° C

T.sal. = 110 ° C

Maltodextrina = 10% en peso.

Spray Gum "C" = 1% en peso.

INDICE

PAG.

CAPITULO I : GENERALIDADES.

I. GENERALIDADES DEL SECADO POR ASPERSIÓN

1.1.1. Definiciones Generales.....	1
1.1.2. Periodos del Secado por Aspersión.....	2
a) Periodo a velocidad de secado constante.....	4
b) Periodo a velocidad de secado decreciente.....	5
1.1.3. Balances de materia y de energía en el secado por aspersión.....	6
1.1.3.1. Relaciones de números adimensionales relacionados con la transferencia de calor y masa.....	9
1.1.4. Sistemas de secado por aspersión.....	11
1.1.4.1. Sistema Abierto.....	11
1.1.4.2. Sistema Cerrado.....	12
a) Semi-cerrado.....	13
b) Auto-Inertizado.....	14
c) Tipo Ambiental.....	15
1.1.4.3. Sistema Aséptico.....	16
1.1.4.4. Sistemas Especiales.....	17
1.1.5. La actividad de agua en los alimentos.....	21
1.1.5.1. Medición de la actividad de agua.....	22
1.1.5.2. Ajuste de la actividad de agua.....	22
1.1.5.3. Isotermas de sorción de humedad.....	24
1.1.5.4. Descripción de isotermas de sorción.....	25
1.1.5.5. Calor isostérico de sorción.....	27

I.2. GENERALIDADES DE LA INGENIERIA DE CALIDAD.

1.2.1. El control de calidad.....	28
1.2.2. La ingeniería de calidad.....	29
1.2.3. Método Taguchi, herramienta básica.....	32

I.3. APLICACION DEL SECADO POR ASPERSIÓN EN:

1.3.1. Extractos Naturales y Sintéticos.....	42
1.3.1.1. Extracto de Yuca.....	42
a) Descripción.....	42
b) Usos.....	43
c) Presentación en el mercado.....	44

CAPITULO II : METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

2.1. EL DESARROLLO METODOLOGICO.

2.1.1. Descripción del desarrollo	45
2.1.2. Diseño Experimental.....	50
2.1.3. Métodos y Recursos.....	58
2.1.3.1. Descripción de Métodos y Recursos.....	58
a) Métodos empleados para la materia prima.....	58
b) Métodos empleados para producto en polvo.....	59
2.1.3.2. Descripción de Equipo e Instrumentos utilizados.....	59
a) Equipo e Instrumentos en la operación del secado.....	59
b) Equipo e Instrumentos en el laboratorio.	61

CAPITULO III : ANALISIS DE RESULTADOS.

3.1. Análisis de la etapa preliminar	63
3.2. Análisis de la etapa definitoria (Método Taguchi).....	70
3.3.1. Análisis de etapa de optimización.	79
3.3.2. Análisis de diámetro promedio de partícula.....	83
3.3.3. Análisis de isothermas de sorción.....	85

CONCLUSIONES	93
---------------------------	----

ANEXOS.

1. Secuencias de cálculo	96
2. Calculo de costo /Kilogramo.....	96
3. Psicrometría.....	97
4. Programa para balance de materia y energía.....	97
5. Higroscopicidad (Isothermas de sorción).....	99
6. Método Taguchi.....	104
7. Memoria de cálculo (ejemplo).....	107
8. Nomenclatura.....	115

BIBLIOGRAFIA	117
---------------------------	-----

INDICE DE FIGURAS

FIGURA:

PAG:

1.- Características del secado por aspersión. Variación de la temperatura de la gota durante el secado.....	3
2.- Características del secado por aspersión. Variación de la presión de vapor de las gotas durante el secado.....	3
3.- Curva de velocidad de secado de gotas durante el secado por aspersión.....	6
4.- Datos del secador para calcular los balances de calor y masa.....	8
5.- Configuración de la evaporación de la gota aplicando alta temperatura.....	11
6.- Sistema abierto.....	12
7.- Sistema cerrado.....	13
8.- Sistema semi-cerrado.....	14
9.- Sistema auto-inertizado.....	14
10.- Sistema de tipo ambiental.....	15
11.- Sistema aséptico.....	17
12.- Sistema energy-mizer deodorizado.....	18
13.- Sistemas de doble o múltiples etapas.....	20
14.- Sistemas que involucran retorno de finos.....	20
15.- Clasificación de los isotermas de sorción.....	25
16.- La ingeniería de calidad.....	30
17.- Función pérdida.....	32
18.- Explicación del gráfico lineal.....	36
19.- Gráficos lineales para un arreglo ortogonal $L_4(2^3)$	36
20.- Secador por aspersión empleado.....	60
21.- Gráfica para flujo volumétrico de extractos de yuca líquidos.....	65
22.- Fenómeno de adherencia del extracto de yuca en polvo.....	66
23.- Gráfica para flujo volumétrico, extracto de yuca líquido (14.5° Brix).....	71
24.- Gráfica para flujo volumétrico, extracto de yuca líquido (36° Brix).....	71
Porcentajes de contribución por factor-nivel óptimo e interacciones (extracto de 14.5° Brix)	
25.- % Humedad.....	73
26.- % Capacidad espumante.....	73
27.- Dispersabilidad (seg).....	73
28.- % Sedimentación.....	73
29.- % Solubilidad.....	73
30.- Densidad aparente (Kg/m^3).....	73
31.- Calor transferido (Kcal/hr).....	74
32.- Eficiencia térmica total (%).....	74
33.- % Eficiencia evaporativa.....	74
34.- Costos (N\$/Kg).....	74
Porcentajes de contribución por factor-nivel óptimo e interacciones (extracto de 36° Brix)	
35.- % Humedad.....	76
36.- % Capacidad espumante.....	76
37.- Dispersabilidad (seg).....	76
38.- % Sedimentación.....	76
39.- % Solubilidad.....	76
40.- Densidad aparente (Kg/m^3).....	76
41.- Calor transferido (Kcal/hr).....	77
42.- Eficiencia térmica total (%).....	77
43.- % Eficiencia evaporativa.....	77
44.- Costos (N\$/Kg).....	77
45.- Distribución de tamaño de partícula.....	84
46.- isoterma de adsorción de humedad. Extracto de yuca en polvo (14.5° Brix).....	86
47.- isoterma de adsorción de humedad. Extracto de yuca en polvo (36° Brix).....	86
48.- Dependencia del contenido de humedad en monocapa (M_0) con la temperatura absoluta (T).....	89
49.- Relación del calor de sorción neto en monocapa (Q_n) con la temperatura absoluta (T).....	89
50.- Calor de sorción para extracto de yuca en polvo (14.5° Brix).....	91
51.- Calor de sorción para extracto de yuca en polvo (36° Brix).....	91

INDICE DE CUADROS

CUADRO:

PAG:

1.- Grupos adimensionales en la transferencia de masa y calor.....	9
2.- Valores propuestos para la ec. $Nu (o Sh) = 2.0 + K Re^x (Pr o Sc)^y$	10
3.- Actividades de agua de soluciones salinas seleccionadas a varias temperaturas.....	24
4.- Arreglo ortogonal $L_4(2^3)$	34
5.- Métodos para determinar las características de calidad y dinámicas.....	53
6.- Variables independientes seleccionadas y niveles.....	54
7.- Interacciones de interés.....	54
8.- Identificación de factores y niveles.....	55
9.- Arreglo ortogonal $L_8(2^7)$. Extracto de yuca (14.5° y 36° Brix).....	55
10.- Cronograma de experimentos del arreglo ortogonal.....	56
11.- Actividades realizadas en cada experimento del arreglo ortogonal.....	57
12.- Métodos y recursos empleados para la materia prima.....	58
13.- Métodos y recursos empleados para el producto en polvo.....	59
14.- Instrumentos empleados en el secado.....	61
15.- Equipos e instrumentos empleados en el laboratorio.....	61
16.- Propiedades de los fluidos.....	63
17.- Ecuaciones para flujo volumétrico.....	65
18.- Condiciones de secado, corridas de etapa preliminar.....	67
19.- Resultados de la etapa preliminar.....	68
20.- Resultados de los balances de materia y energía.....	69
21.- Atributos de calidad del polvo obtenido.....	70
22.- Ecuaciones para flujo volumétrico (extracto líquido de 14.5° Brix).....	72
23.- Ecuaciones para flujo volumétrico (extracto líquido de 36° Brix).....	72
24.- Interacciones del $L_3(2^2)$ para muestra de 14.5° Brix.....	78
25.- Interacciones del $L_3(2^2)$ para muestra de 36° Brix (diluida).....	79
26.- Ecuaciones de predicción para muestra de 14.5° Brix.....	79
27.- Ecuaciones de predicción para muestra de 36° Brix (diluida).....	80
28.- Factor- nivel óptimo y valor predicho para extracto de yuca (14.5° Brix).....	80
29.- Factor- nivel óptimo y valor predicho para extracto de yuca (36° Brix).....	80
30.- Producción (Gramos-litro/hr), extracto de 14.5° Brix.....	81
31.- Producción (Gramos-litro/hr), extracto de 36° Brix.....	81
32.- Cuadro comparativo de valores promedio. Extracto de yuca en polvo (14.5° Brix).....	82
33.- Cuadro comparativo de valores promedio. Extracto de yuca en polvo (36° Brix).....	83
34.- Diámetro promedio de partícula (microscopio óptico).....	83
35.- Ecuaciones obtenidas para el extracto de yuca en polvo (14.5° Brix).....	87
36.- Ecuaciones obtenidas para el extracto de yuca en polvo (36° Brix).....	87
37.- Contenidos de humedad en monocapa a diferentes temperaturas. evaluados por las ecuaciones de B.E.T. y G.A.B. para los extractos en polvo.....	88
38.- Calores de sorción de humedad, calculados para los extractos de yuca en polvo.....	90

CAPITULO I

GENERALIDADES DEL SECADO POR ASPERSION

1.1 GENERALIDADES DEL SECADO POR ASPERSION

1.1.1 Definiciones generales.

El Secado.

Secado se refiere a la eliminación de humedad (agua libre o ligada) de una sustancia, mediante procedimientos térmicos. La operación unitaria del secado, en el procesado de alimentos, emplea generalmente aire caliente y seco. (27,29,44, 54).

El término implica la transferencia de humedad, cuando un sólido húmedo se pone en contacto con una corriente de aire con menor humedad que la correspondiente a la de equilibrio, éste sólido tiende a perder humedad y secarse hasta alcanzar el equilibrio con el aire. (33).

Para la elección de un método de secado es preciso tener en cuenta la naturaleza de la sustancia y su estado: sólido, con tejidos y/o poros, corrosivo, tóxico, líquido, pastoso o papilla, etc.(41).

El tipo de secadores más eficientes son los directos, dentro de ésta categoría se encuentran los secadores por atomización o aspersión (29,33).

El Secado por Aspersión.

El proceso de secado por aspersión transforma a un fluido bombeable alimentado en un producto seco mediante una aspersión simple. El fluido se atomiza usando un disco rotatorio o una boquilla, y el rociado de gotas entra inmediatamente en contacto con un flujo de un medio secante caliente, generalmente aire. El tiempo de secado de las gotas es muy corto en comparación con otros procesos de secado. Las bajas temperaturas del producto y los cortos tiempos de secado permiten la deshidratación de muchos productos sensibles al calor (27,29, 33,44, 54).

El procedimiento consta de 4 etapas principales (33,40):

- 1.- Atomización de la alimentación.
- 2.- Contacto de aire caliente-rociado.
- 3.- Secado del esparado o evaporación.
- 4.- Separación del producto seco del aire.

Esta es una operación del procesado de alimentos que requiere del conocimiento de ciertos conceptos, definiciones y principios útiles que permitan advertir todas y cada una de las variables que se relacionan con dicho proceso; facilitando de esta manera su entendimiento y ejecución.

1.1.2. Periodos del secado por aspersión.

La deshidratación involucra la transferencia simultánea de calor, masa y momentum en la cuál el calor penetra en el producto y la humedad se elimina por evaporación en una fase gaseosa insaturada. Aún no ha existido una teoría generalizada que explique el mecanismo del movimiento de humedad interna de un alimento en deshidratación. Sobre las bases del comportamiento del secado, Bruin y Luyben (en 1980) (44), dividieron los alimentos en tres categorías: (1) Soluciones líquidas y geles tales como leche, jugos frutales, productos gelatinizados, y soluciones que contienen materiales disueltos; (2) Alimentos rígidos Poroso-Capilares, como harina y maíz; y (3) Alimentos coloidales poroso-capilares, tales como carnes, vegetales y tejidos.

En los alimentos de categoría 1, la humedad se mueve desde el interior a la superficie por difusión molecular, de donde se elimina por evaporación. En el caso de materiales de categoría 2, los espacios intersticiales, capilares, y cavidades llenas de gas existen entre la matriz del alimento, y el transporte de agua puede tener lugar por varios mecanismos posibles, actuando en varias combinaciones.

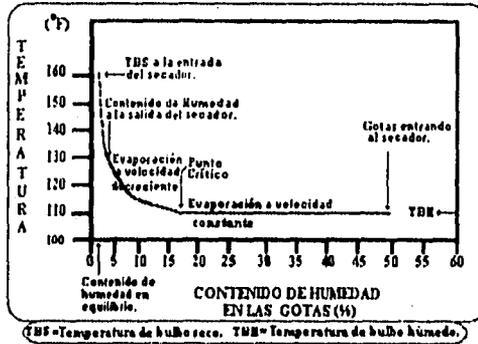
Los posibles mecanismos propuestos por otros investigadores (33) incluyen la difusión líquida debida a gradientes de concentración, transporte de líquido debido a fuerzas capilares, difusión de vapor debida a gradientes de presiones de vapor parciales, transporte de líquido o vapor debido a la diferencia en la presión total causada por la presión y temperatura externas, efectos de evaporación y condensación, difusión superficial, y transporte de líquido debido a la gravedad. (7.29.33.44). Existe también un factor denominado efecto termogradiante que permite el transporte de humedad por un gradiente de temperaturas debido a un enlace termodinámico de procesos de transporte másico y térmico. (7.33.44).

El secado por aspersión contribuye a la calidad total del producto final. Idealmente hablando, debe ser un proceso de remoción de humedad reversible. Sin embargo, las pérdidas de atributos nutricionales y funcionales varían con respecto al tipo y sensibilidad del componente específico del alimento (29.33.44).

Las características de secado de las gotas durante la operación se ilustran mejor trazando gráficas de las variaciones en la velocidad de evaporación y los cambios acompañados de temperatura en la gota y la presión de vapor conforme decrece la humedad en ésta.

En la figura 1 se muestran los cambios de contenido de humedad con la temperatura del aire de gotas entrando con 50% de sólidos totales. En ésta se observa que para secar el producto debe estar en contacto con aire caliente y en ninguna etapa del proceso se deben tener temperaturas del producto excesivas para evitar la degradación de éste. El producto sale del secador mucho antes de que su temperatura se eleve hasta aproximarse a la temperatura del aire de salida.(29.33)

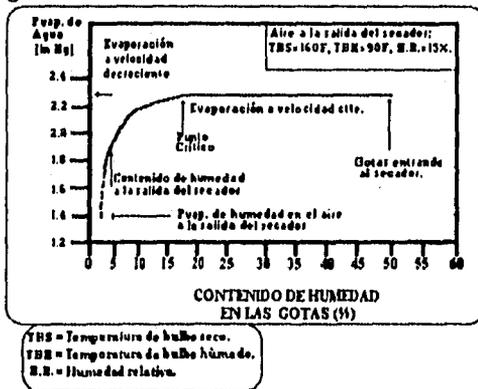
Figura 1. Características del secado por aspersión. Variación de la temperatura de la gota durante el secado.



Fuente: MASTERS. K. Spray Drying. An Introduction. Ed G.G.L. London. 1976

La figura 2 muestra los cambios de presión de vapor durante el secado de la gota. La presión de vapor durante el periodo inicial de secado es la correspondiente a la temperatura del bulbo húmedo.(29.33).

Figura 2. Características del secado por aspersión. Variación de la presión de vapor de las gotas durante el secado.



Fuente: MASTERS. K. Spray Drying. An Introduction. Ed G.G.L. London. 1976

En este proceso de secado por aire caliente, se observan, generalmente, dos periodos de secado (Ver figura 3, pagina 6.): Uno inicial llamado *periodo de velocidad constante* en el cuál el secado de las gotas asperjadas ocurre conforme el agua pura empieza a ser evaporada en una velocidad cercana a constante y una temperatura superficial constante, y es seguido por otro *periodo de velocidad decreciente* donde el movimiento de humedad es controlado por resistencias internas, hasta que el contenido de humedad en la gota es reducido a un nivel conocido como el contenido de humedad en equilibrio. (29,33,49).

En la curva de velocidad de secado, se expresa la ordenada (eje Y) en unidades de peso de agua evaporada por unidad de tiempo por unidad de área y es comúnmente llamado *flux* de secado. La abcisa (eje X) está expresada en unidad de peso de humedad por unidad de peso de producto seco o también en porcentaje de contenido de humedad. Se obtienen diferentes formas para diferentes productos y condiciones de secado (33).

Periodo de velocidad constante.

La mayor parte de la humedad en las gotas se remueve durante el primer periodo de secado. En éste, la humedad emigra desde el interior de la gota a una gran velocidad para mantener la saturación en la superficie, en estas condiciones la temperatura de bulbo húmedo representa la temperatura de la gota (33). La velocidad de evaporación puede ser considerada constante, aunque esto no es estrictamente cierto. En la operación del secado por aspersión la evaporación de la gota comienza con el contacto inmediato aire-asperjado, y la rápida transferencia de humedad en el aire es acompañada por una disminución en la temperatura del mismo. Mientras exista la humedad no ligada, el proceso de secado estará en un periodo de velocidad constante y podría continuar mientras la velocidad de difusión de humedad entre la gota asperjada sea rápida y pueda mantener en condiciones saturadas la superficie.

Cuando el flujo por difusión y capilaridad no puedan mantener estas condiciones, el punto crítico está próximo y la velocidad de secado podría declinar hasta obtener el contenido de humedad de equilibrio. Cualquier temperatura baja en el aire reduce la fuerza transmisora para la transferencia de calor, y la velocidad de evaporación puede comenzar a caer si no se logra mantener condiciones de saturación (33). Sin embargo, es común referirse a la fase inicial del secado de gotas como el periodo de velocidad constante.

Si la temperatura del aire es tan alta que la fuerza transmisora de temperatura permite que la evaporación comience a una velocidad donde la migración de humedad pueda mantener la superficie húmeda desde el inicio, la gota podría experimentar un pequeño periodo de velocidad constante. Una capa seca se formaría instantáneamente en la superficie de la gota. (29,33,44,49).

Esta capa seca es una barrera para la transferencia de humedad, y actúa reteniendo la humedad entre la gota. Entonces, las temperaturas de secado de entrada pueden realmente influenciar las características del producto seco; un incremento en la temperatura de entrada podría causar la rápida formación de la capa externa seca; y por otro lado una temperatura del aire más baja conduciría a una velocidad de secado inicial más baja, con la permanencia de una temperatura superficial sobre periodos de mayor tiempo(33,44).

Los tiempos de evaporación para gotas en contacto con aire a temperatura fija, dependen de la forma de gota, composición química, estructura física y de la concentración de sólidos (33,44). El tiempo total de secado es la suma de los periodos de velocidad constante y velocidad decreciente hasta aproximarse al nivel de humedad deseado.(33)

El primer periodo del secado puede dividirse teóricamente en dos fases (ver figura 3). Donde en la primera fase, del punto A al punto B, la velocidad de secado se establece inmediatamente del contacto del asperjado con el aire secante. Hay un ligero incremento de temperatura superficial en la gota, y la velocidad de secado se incrementa en los milisegundos requeridos para que el calor transferido cruce la interfase gota-aire y se establezca el equilibrio.

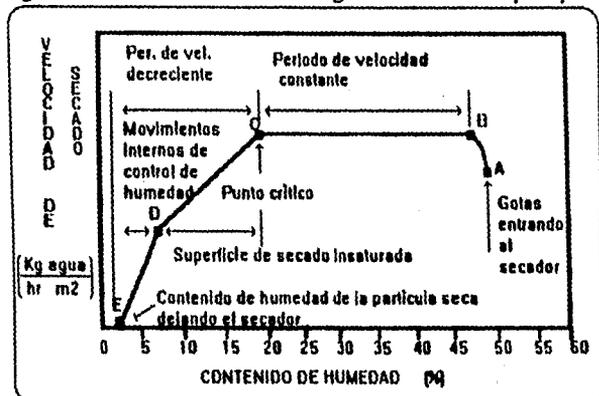
En la fase siguiente, la del punto B al C, se representan las condiciones del equilibrio dinámico. El secado procede a velocidad constante, la cuál es la velocidad más elevada obtenida durante toda la historia de evaporación de la gota. La superficie de la gota se mantiene saturada por la migración adecuada de humedad desde el interior a la superficie.

Periodo de velocidad decreciente.

Cuando la migración de humedad a la superficie se vuelve el factor limitante en la velocidad de secado, los niveles de humedad más bajos en la migración entre la gota y un punto, se obtienen eventualmente. La superficie no puede mantenerse humedecida por más tiempo, ocasionándose una pendiente en la velocidad de secado. Como ya se vio, la velocidad en la migración de humedad se afecta por la temperatura del aire circundante.

Este periodo decreciente teóricamente se analiza en dos fases, que pueden presentarse en el secado: La fase marcada del punto C al punto D (ver figura 3), representa el inicio de la pendiente desde el punto crítico C, cuando la humedad de la gota no puede mantener las condiciones de saturación en la superficie; este periodo puede formar más de una fase, si permanecen áreas humedecidas locales sobre la superficie de la gota. La fase C-D continúa hasta que no permanezcan las áreas humedecidas (33).

Figura 3. Curva de velocidad de secado de gotas durante el secado por aspersión.



Fuente: MASTERS. K. Spray Drying. An Introduction. Ed G.G.L. London. 1976

En otra fase, denominada D-E, la evaporación continúa en una velocidad decreciente hasta que la gota adquiere un contenido de humedad en equilibrio con el aire periférico. La aproximación al contenido de humedad de equilibrio E es lenta; ya que la resistencia a la transferencia de masa está totalmente en la capa sólida. Por ello la temperatura de la gota/partícula aumenta al paso de las dos fases del periodo de velocidad decreciente.(11)

La figura 3 es sólo un diagrama teórico, en realidad las curvas de secado no tienen puntos claramente definidos. Algunas de las zonas que se muestran pueden ni siquiera ocurrir. Por ejemplo, en el secado por aspersión de productos que son termosensibles, las temperaturas del aire aplicadas son bajas y la fase A-B puede muy bien extenderse hasta que el punto crítico esté próximo. En este caso puede decirse que no se caracterizó el habitual periodo de velocidad constante.

1.1.3. Balances de Materia y Energía en el Secado por Aspersión.

El cálculo de los balances de materia y de energía constituye la base de las ingenierías química y de alimentos, por tal razón son esenciales para la evaluación del funcionamiento del secador y nos sirven para obtener desde datos de temperaturas hasta los flujos de aire-producto para su operación en condiciones previamente planteadas.(7,33,53). Principalmente se consideran las leyes de la conservación de masa y la energía para determinar los requerimientos de materia prima y energéticos para un procesamiento, como el secado por aspersión.

Las operaciones de transferencia (masa, calor y momentum) se basan en la relación:

$$\text{Velocidad de transferencia} = \text{Fuerza Impulsora} / \text{Resistencia.} \quad (1)$$

La fuerza impulsora (factor extensivo) para la evaporación de humedad desde una superficie saturada es la diferencia entre la presión de vapor de agua a la temperatura de la superficie y la presión parcial del vapor de agua en el aire de secado ($P_{wB} - p_w$)^{*} (33). Esta fuerza puede ser igualmente bien expresada en términos de diferencia en Humedades en la superficie saturada (H_w) y la Humedad del aire (H_a). La velocidad de transferencia de masa desde una superficie saturada es igual a:

$$dW/dt = k_g A (H_w - H_a) = k_v A (P_{wB} - p_w) \quad (2)$$

Para un equilibrio dinámico la velocidad de transferencia de calor es igual al producto de la velocidad de transferencia de masa y el calor latente de vaporización (33). La velocidad de transferencia de calor desde una superficie saturada equivale a:

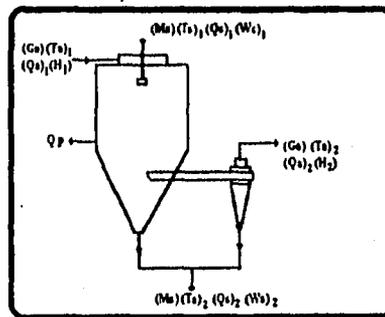
$$dQ/dt = h_c A (T_s - T_{wB}) = (dW/dt) \lambda \quad (3)$$

El análisis previo al cálculo de los balances másico y energético del secado por aspersión incluye las consideraciones tomadas por anteriores investigadores (33,34 y 35) como Frossling, Sherwood y Williams, quienes a partir de estudios sobre la evaporación de gotas de líquido puro recomendaron ecuaciones de números adimensionales a diferentes intervalos de número de Reynolds (ver cuadro 2), además de otra serie de ecuaciones para determinar el tiempo de evaporación de las gotas en el caso de estar a velocidades relativas de cero, de donde se sabe que éste es proporcional al cuadrado del diámetro inicial de la gota e inversamente proporcional a la diferencia media logarítmica de las temperaturas en la capa límite que rodea la gota y a la conductividad térmica de la misma; y en el caso de tener velocidad relativa considerable, se requiere evaluar los intervalos de número de Reynolds y la región de ley de Stokes (33,34). Sin embargo, el periodo de tiempo donde la velocidad relativa existe es muy corto, y generalmente se espera que una partícula asperjada en un secador por aspersión se encuentre en la región de flujo de la ley de Stokes. No obstante, las ecuaciones y expresiones presentadas en la referencia son aproximaciones; en los casos reales y prácticos donde existen sólidos en las gotas, la formación de una fase sólida ofrece la principal resistencia a la evaporación del agua contenida.

De acuerdo con las leyes de conservación, para una operación continua con retención despreciable del producto en la cámara de secado; la masa de aire suministrada y alimentación, por tiempo dado equivale a las salidas de aire y producto más las pérdidas de calor desde la cámara.(7,33,34). Si las pérdidas de calor son consideradas despreciables, la temperatura de las gotas sigue la curva de humidificación adiabática en la carta psicrométrica.

Para una operación semi-continua, existe una retención de producto en el secador; está diferencia entre la entrada y la salida de producto equivale a la acumulación.(33). Los balances de materia y de energía pueden ser explicados y referidos por la Figura 4.

Figura 4. Datos del secador para calcular los balances de calor y masa.



Fuente: MASTERS. K. Spray Drying. An Introduction. Ed G.G.L. London. 1976

Comúnmente, los balances de humedad se basan en una unidad de peso de producto seco. Así, suponiendo que se alimenta al secador una solución con cantidad de sólidos M_s ; se considera que se obtiene un producto sólido con contenido de humedad $(W_s)_2$ (ver figura 4). De ésta forma el aire de secado sirve de gas "acarreador" y es el que contiene la humedad evaporada de la alimentación inicial.

El balance de calor o de energía, está basado en las temperaturas de la aplicación y las propiedades de la solución alimentada, del aire suministrado, de los productos y aire de salida (33). Su cálculo está muy relacionado con el balance de materia. Para el caso de una cámara aislada es válido suponer que no hay fuente externa que suministre calor; el necesario para la evaporación del agua de las gotas asperjadas lo transfiere el aire caliente que entra a la misma.

Para calcular las entalpías del aire alimentado y el producto, se usa una temperatura de referencia (del punto inicial de congelación del agua) (29,33). La temperatura de la alimentación al atomizarse es $(T_a)_1$ y el producto se descarga a una temperatura de $(T_a)_2$.

El aire de secado se suministra al secador a una velocidad de G_1 con una temperatura (T_1) . La humedad absoluta del aire a la entrada es H_1 , y se incrementa durante la operación de secado a H_2 . El aire que deja el secador está a temperatura (T_2) . (ver figura 4).

1.1.3.1. Grupos adimensionales relacionados con la transferencia de masa y calor.

La cantidad de humedad removida desde una gota presente en el secador por atomización, depende del mecanismo que gobierna la velocidad de evaporación y los tiempos de residencia resultan del movimiento aire-asperjado mantenido en la cámara de secado.(33,34,35). Durante la mayor parte del viaje de las gotas asperjadas, éstas son influenciadas por el flujo de aire y las velocidades relativas entre el aire y las gotas son muy bajas. De acuerdo con algunos investigadores (33,34,35), en condiciones de velocidad relativa de cero o despreciables; una gota puede tener una velocidad de evaporación idéntica a la que tendría bajo condiciones de aire quieto, esto puede aplicarse justificadamente a muchas condiciones de secado por aspersión. No obstante, en operaciones normales, las velocidades de evaporación se incrementan al aumentarse la velocidad relativa entre aire-gota debido a la evaporación adicional causada por la convección en la capa límite.(33). En los cálculos de la velocidad de transferencia, estas condiciones de flujo más las propiedades de la gota están representadas en combinaciones de grupos adimensionales (4,33,53,54). El cuadro 1, contiene la típica explicación de estos grupos adimensionales.

Cuadro 1. Grupos adimensionales en la transferencia de masa y calor.

GRUPO	SIGNIFICADO	SÍMBOLO
Reynolds (Re)	Fzas. de Inercia/ Fzas Viscosas	$[Dv \rho_a / \mu_a]$
Prandtl (Pr)	Difusividad Cinemática / Difusividad Térmica	$[Cp \mu_a / K_d]$
Schmidt (Sc)	Viscosidad Cinemática / Difusividad Molecular	$[\mu_a / Dv \rho_a]$
Nusselt (Nu)	Calor Total Transferido / Calor Transferido Conductivo	$[h_c D / K_d]$
Sherwood (Sh)	Difusividad Másica / Difusividad Molecular	$[K_g D / Dv]$

Fuente: MASTERS, K. SPRAY DRYING. AN INTRODUCTION... Ed.G.G.L. London. 1976. (33).

Los coeficientes totales de transferencia, para la transferencia desde una gota esférica pueden expresarse en términos de éstos grupos adimensionales:

a) Bajo condiciones de velocidad relativa despreciable.

$$\text{Transferencia de calor: } Nu = 2.0 \quad (4)$$

$$\text{Transferencia de masa: } Sh = 2.0 \quad (5)$$

b) Bajo condiciones de velocidad relativa considerable.

$$\text{Transferencia de calor: } Nu = 2 + K_1(Re)^X (Pr)^Y \quad (6)$$

$$\text{Transferencia de Masa: } Sh = 2 + K_2(Re)^X (Sc)^Y \quad (7)$$

Hay una gran discusión sobre los valores de los exponentes (X), (Y), (X'), (Y') y de las constantes K_1 y K_2 . Rowe, Claxton y Lewis (33), determinaron valores para los anteriores exponentes y constantes, y por comparación con datos de otros investigadores concluyeron que :

$$X = X' = 0.5 \quad (8)$$

$$Y = Y' = 0.33 \quad (9)$$

El valor de X aceptado generalmente para condiciones de evaporación en secado por aspersión es 0.5 (ver cuadro 2). Este se aplica a un intervalo de Re entre 100 y 1000. El movimiento de pequeñas gotas en éste intervalo ocurre sólo en las primeras fracciones de segundo del viaje; y entonces, mucho de la evaporación acontece en gotas a Re por debajo de 100. (33).

La forma más aplicada es la ecuación Ranz-Marshall (29,33,54):

$$Nu = 2.0 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (10)$$

$$Sh = 2.0 + 0.6 Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (11)$$

Cuadro 2. Valores propuestos para la Ec. Nu (o Sh) = $2.0 + K Re^X (Pr$ o $Sc)^Y$.

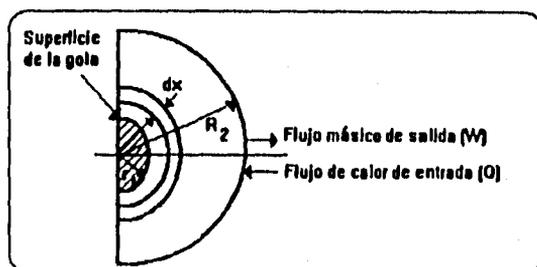
Investigadores	Sistema Estudiado	K	X	Y	Intervalo de Re
Ranz-Marshall	Transf. de Masa	0.6	0.5	0.33	2-200
Ingebo	" Calor	0.303	0.6	0.6	0-500
Frössling	" Masa	0.552	0.5	0.33	2-1300
Maxwell-Storrow	" Masa	0.552	0.5	0.33	1-1000
Tsubochi-Sato	" Calor	0.50	0.5	0.33	0.1-100
Kugryasher-Ipatenko	" Calor	0.326	0.5	0.33	1-300
Yuge	" Calor	0.483	0.5	0.33	10-1800

Fuente: MASTERS, K. *SPRAY DRYING: AN INTRODUCTION...* Ed. G.G.L. London. 1976. (33).

Al aplicar las ecuaciones anteriores se deben considerar ciertas limitaciones. (33)

En el caso de alimentaciones con sólidos solubles disueltos cambian algunas consideraciones, al evaluar las velocidades de evaporación. Esto se debe principalmente a que la presencia de los sólidos en las gotas reduce la velocidad de evaporación, lo cual es causa del efecto de reducción en la presión de vapor, el efecto de la formación de sólido seco sobre la gota y los cambios de diámetro sufridos por la gota-partícula. (29,33).

Otro efecto importante lo tiene el manejar temperaturas elevadas en el aire de secado, ya que tiende a modificarse el mecanismo de evaporación a través de la capa límite, haciendo que la diferencia de temperaturas entre la superficie de la gota y el aire circundante, esté en función de la distancia radial entre ésta capa límite y el centro de la gota-partícula. (Ver figura 5).



Fuente: MASTERS, K. *SPRAY DRYING: AN INTRODUCTION...* Ed. G.G.L. London, 1976. (33).

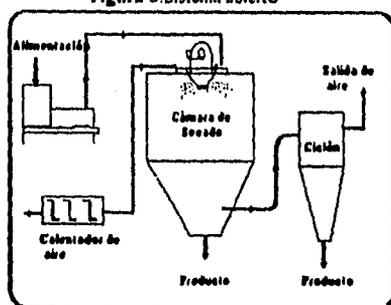
1.1.4. Sistemas de secado por aspersión.

En la industria, dependiendo de sus requerimientos, existen mediante una combinación de los elementos esenciales de una planta de secado por atomización - atomizador, dispersor de aire, cámara de secado, sistemas de entrada y salida del aire - diferentes sistemas de producción, los cuales cumplen las especificaciones individuales de seguridad operacional, protección ambiental y tratamiento de los productos secos. A todos estos se les pueden acoplar equipos de post-tratamiento; tal como el lecho fluidizado, para secado/enfriamiento y transporte (14,40). A continuación mencionamos los sistemas de manera breve, con el fin de que se conozca la versatilidad del secado por aspersión creada por su amplia y variada necesidad de aplicación.

1.1.4.1. Sistema abierto.

Este es el más usado por la mayoría de las plantas industriales para productos de alimentación acuosa. (ver figura 6) Consiste en un flujo de aire de un paso único, con salida a la atmósfera y para calentar el aire de secado se puede aplicar calentamiento directo o indirecto (14,40). La limpieza del aire de salida se efectúa mediante ciclones, filtros de mangas, precipitadores electrostáticos o lavadores.

Figura 6. Sistema abierto



El sistema puede tener las siguientes características especiales:

- Dispersores de aire para atomizadores centrífugos y de boquillas.
- Cámaras de secado resistentes a aumentos bruscos de presión, con aberturas o sistemas de interrupción para protección contra explosiones.
- Sistemas de limpieza semi o totalmente automáticos.
- Lavadores vía húmeda biológicos para la eliminación de malos olores en el aire de salida.
- Sistemas de control convencionales o computarizados.
- Recuperadores de calor residual, tipo aire/aire o aire/líquido/aire.
- Barrido neumático para la cámara de secado.
- Insonorización de componentes.
- Acabado resistente a la intemperie para las instalaciones al aire libre.

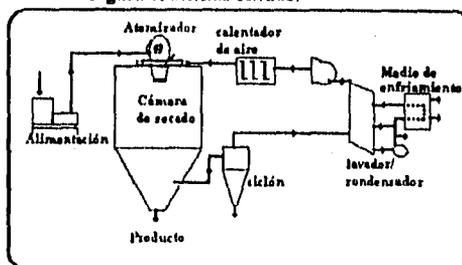
1.1.4.2. Sistema cerrado.

En la operación de Sistema cerrado se busca eliminar la contaminación microbiana del aire, el riesgo de explosiones, la oxidación de productos; y obtener la recuperación de disolventes (14.40).

En la mayoría de los diseños de secadores por aspersión se opera con sistemas suministradores de aire atmosférico, el cual después de ser utilizado para la operación del secado es nuevamente expulsado a la atmósfera sin contener partículas extrañas. Sin embargo, cuando se involucran disolventes orgánicos, el aire de secado debe ser sustituido por gas inerte para eliminar riesgos de explosión. Además, la emisión continua de disolvente desde un sistema abierto podría crear serios problemas de contaminación (14). El gas inerte que generalmente se usa es el nitrógeno, y debe ser recirculado (ver figura 7).

Se requiere aplicar una alta eficiencia de condensación para así asegurar la máxima recuperación del disolvente. las pérdidas de disolvente y gas inerte son inaceptables (14,40).

Figura 7. Sistema cerrado.



En este caso el gas de secado se calienta de forma indirecta por medio de calentadores de fase líquida o vapor. Un secador por aspersión de ciclo cerrado es más caro que el de ciclo abierto, debido a los requerimientos especiales de construcción para prevenir pérdidas de gas inerte y encharcamientos de disolvente, equipo especializado de condensación del disolvente, extensiva instrumentación y requerimientos de control (14).

Algunas características especiales que puede tener son:

- Atomizadores centrífugos con purga de gas inerte.
- Sistemas semi o totalmente automáticos para la limpieza de los disolventes.
- Planta compacta.
- Disponibilidad de ciclones o filtros de mangas.
- Condensadores de hasta -30°C .

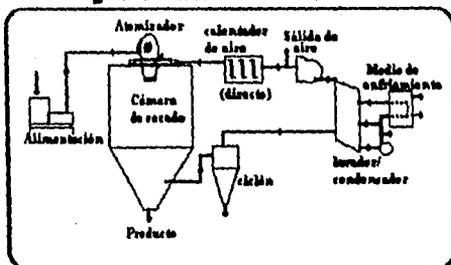
1.1.4.2.a. Sistema semi-cerrado.

Es un sistema equipado con recirculación parcial (recirculado hasta un 60% del aire de salida en forma de aire de entrada a la planta, para aprovechamiento eficaz del calor). Es una versión modificada y de bajo costo del sistema de ciclo cerrado (figura 8) es aplicable al secado de alimentaciones acuosas cuando el producto sólo debe estar en contacto con aire de bajo contenido en oxígeno debido a las tendencias explosivas y oxidativas de los polvos, por lo que no deben ser emitidos a la atmósfera (14,40).

La formación de un sistema inerte se logra por el uso de un calentador de gas-aire directo. Se evita una excesiva combustión de aire. La combustión de gases se usa como un medio de secado, manteniendo el contenido de oxígeno en bajos niveles.

Si se producen malos olores durante el secado, es posible incinerar de manera eficaz y económica las pequeñas cantidades de aire purgadas del sistema (40).

Figura 8. Sistema semi-cerrado.

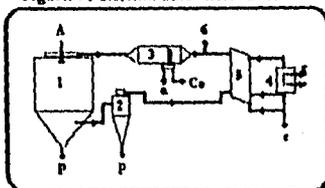


1.1.4.2.b. Sistema "auto-inertizado".

Este sistema (ver figura 9) es similar al anterior. Para mantener las condiciones de operación correctas el gas recirculado se saca continuamente del sistema para compensar la combustión de los gases entrando al sistema en el calentador. Este se llama lógicamente "auto-inertizado", y tiene las siguientes ventajas comparado con el sistema de ciclo cerrado convencional(14):

- No hay necesidad de N₂ u otro gas inerte.
- No hay necesidad de una construcción de un secador absolutamente hermético, puede construirse con componentes estándares.
- Debido al calentamiento directo es posible alcanzar las más altas temperaturas del gas de secado.
- Obtención de una alta economía térmica de la operación de secado.

Figura 9. Sistema auto-inertizado.



A=Alimentación
 a= Aire de combustión
 Co=Combustible(gas)
 c= Descarga de cenizas
 P=producto en polvo
 1=Cámara del secador
 2=Ciclón
 3=calentador directo de aire
 4=Intercambiador de calor
 5=secador/condensador
 6=descarga de aire a la atmósfera.

La cámara opera bajo un ligero vacío como en un sistema de ciclo abierto estándar. En comparación con el sistema de ciclo abierto el concepto de inertizado ofrece una reducción radical de contaminación del aire desde la planta (14).

1.1.4.2.c. Tipo ambiental.

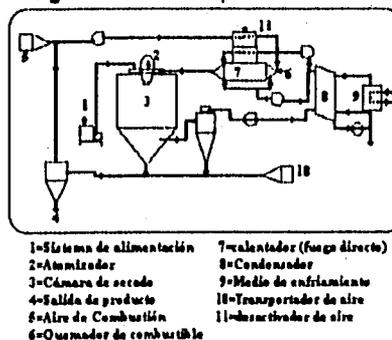
Este secador especial ha sido desarrollado para alimentaciones acuosas que generan olores desagradables durante el secado, o que consisten de materiales tóxicos, y/o de mezclas potenciales de polvo-aire en el secador.

Las características de sistema de secado (auto-inertizado) incorpora la desactivación (incineración) y etapas de recuperación del calor para eliminar emisiones residuales de material activo/toxico, mientras se recupera el calor para re-usarse en el secador por aspersión (14).

El arreglo se basa en el principio de reciclado del medio de secado el cuál es una atmósfera con poco oxígeno, generada a través del control preciso de combustión en el calentador del secador. El contenido de oxígeno del medio de secado se mantiene usualmente alrededor de 4%. (14) La completa desactivación del aire que se requiere sacar del secador a la atmósfera se obtiene con temperaturas de 700 a 800 °C (14).

La desactivación y la recuperación del calor tienen lugar en un calentador de flama directa especial con un intercambiador de calor asociado. El volumen del aire expulsado es muy bajo comparado con el del medio recirculado.

Figura 10. Sistema de tipo ambiental.



Los productos que idealmente se manejan en éste sistema (ver figura 10) son: pesticidas, colorantes, fermentaciones, y productos farmacéuticos. Muchas otras aplicaciones son previstas desde uno o todos los riesgos de proceso enlistados a continuación, y pueden ser prevenidas a través de ésta u otras versiones modificadas de el concepto del sistema (14):

- Eliminación de emisiones de polvo a la atmósfera.
- Eliminación de emisiones de olores a la atmósfera.
- Eliminación de riesgos de explosiones/fuego aire-polvos.
- Eliminación de emisiones de material toxico/ activo a la atmósfera.

Este secador protege al ambiente de olores, emisiones de partículas, mientras minimiza el consumo de combustible a través de una recuperación efectiva del calor. Puede utilizarse una atomización por disco o boquilla en la cámara de secado, asociada con un calentador de gas directo o de flama de aceite. La recolección del producto seco tiene lugar en ciclones o bolsas filtrantes.

1.1.4.3. Sistema aséptico.

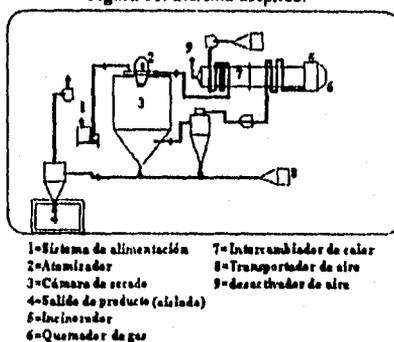
En las plantas asépticas se busca la atomización estéril de la alimentación y se cuenta con sistemas de filtración de aire estéril también. Estas plantas se utilizan cuando se necesita evitar cualquier contaminación del producto seco. Se construyen, generalmente, con acabados de gran calidad y operan bajo una ligera presión. En la industria se encuentran disponibles sistemas especiales de limpieza y esterilización totalmente automatizados (14,33).

Las plantas de secado por aspersión con circuito aséptico deben cumplir con los siguientes preceptos (14):

- Todas las partes deben ser estrictamente herméticas.
- Tanto la alimentación como el aire son filtrados estériles antes de entrar al secador (filtración absoluta).
- En ningún momento debe haber partes móviles en contacto con la alimentación y el aire después de la filtración o con el polvo producido.
- Todas las partes del secador tales como dispersor de aire, cámara, ductos cortos directos al ciclón, tendrán una superficie lisa y puntas redondas, conexiones sin articulación u otras áreas que retengan el polvo.
- La planta debe ser fácil de limpiar, secar y esterilizar. Por medio de una reducción en el sistema de flujo de aire, puede aumentarse la temperatura hasta 250 °C y alcanzar una esterilización.
- Mantener un flujo de aire reducido y una pequeña sobrepresión que asegure la nula entrada de material exterior durante los periodos de envasado de la planta.
- Contar con filtros absolutos que puedan permanecer aproximadamente hasta 300 °C de temperatura del aire y tener 99.97 % de eficiencia sobre partículas arriba de 0.3 micrones de tamaño. La eficiencia de prefiltros podrá ser de 95 %.

En la figura 11 se muestra una línea de proceso típica de secado por aspersión aséptica para suero hidrolizado (14). Después de la separación, el polvo se envasa fuera del ciclón en un cuarto limpio con flujo laminar de aire.

Figura 11. Sistema aséptico.



Cuando se mantiene un aire limpio y una alimentación estéril en una planta aséptica no se tiene actividad microbiana alguna, excepto en el caso de tener condiciones de proceso tales como: temperatura y humedad del aire de secado, temperatura y humedad del polvo, más el factor tiempo; en niveles críticos para iniciar actividad microbiana de elementos presentes en el producto.

1.1.4.4. Sistemas especiales.

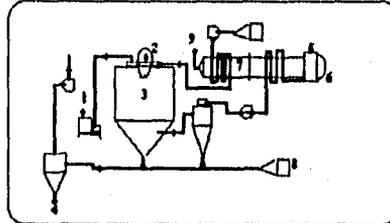
1.1.4.4.a. Sistema energy-mizer desodorizado.

Este circuito está equipado con un incinerador-calentador-recuperador especial (posiciones 5-6-7 de la Figura 12), para que cuando el aire de salida contenga olores sea calentado prudentemente (desde 100° C a 400° C y 800° C) y enfriado a 400° y 180° C. En el intercambiador de calor el aire puede ser calentado hasta 240° C (14).

Por medio de esto se obtiene:

- Incineración a 800° C.
- Recuperación del calor. (bajas pérdidas de calor).
- Calentamiento del aire de secado.

Figura 12. Sistema energy-mixer desodorizado.



- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1= Sistema de alimentación | 7= Intercambiador de calor |
| 2= Atomizador | 8= Transportador de aire |
| 3= Cámara de secado | 9= desactivador de olor |
| 4= Salida de producto | |
| 5= Inclinador | |
| 6= Quemador de gas | |

1.1.4.4.b. Recirculación parcial del aire de salida.

Para sistema de ciclo abierto operando a altas temperaturas de entrada, se pierde una cantidad considerable de calor-residual en el aire de salida, contribuyendo a tener consumos elevados de combustible en la planta. Es posible con muchos productos inorgánicos, que no son sensibles al calor, adoptar un re-uso parcial del aire de salida para reducir los costos de combustible por recuperación de este calor residual, esto se consigue recirculando arriba del 30% del aire de salida desde los separadores de polvo seco y retornando éste al ducto del aire de entrada de la cámara de secado. Sólo que el aire debe calentarse para mantener las condiciones de temperatura de entrada deseadas. El aire de salida recirculado tiene una humedad mayor que el aire fresco, así que la extensión de reciclado debe controlarse para que los niveles incrementados de humedad en el aire secante de entrada no afecten el proceso de secado apreciablemente en términos de temperaturas de entrada, más altas para obtener los mismos niveles de humedad en el producto (33).

1.1.4.4.c. Sistemas empleando técnicas especiales de enfriamiento.

Estos sistemas se emplean para productos que son muy sensibles al calor o son termoplásticos, teniendo bajos puntos de suavización, o que son higroscópicos (33). Tales propiedades dan al producto tendencias a formar depósitos sobre la pared de la cámara de secado y estos depósitos provocan largos tiempos de residencia del producto llevando a una posible degradación en la calidad del mismo.

1.1.4.4.d. Sistemas de doble etapa (múltiples).

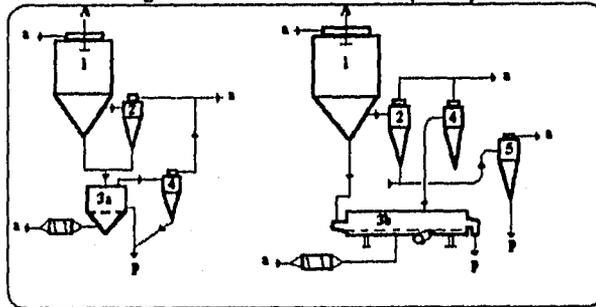
Todos los sistemas mencionados anteriormente representan plantas capaces de producir la calidad de producto deseada, directamente desde un sistema de una etapa, ya que la mayoría de los productos secados por aspersión hoy en día, se obtienen de su aplicación. Como la lista de aplicación en productos se incrementa y se manejan más productos complejos, y en las mismas especificaciones de tiempo se vuelven más exigentes, es más difícil un secado exitoso en un sistema de una etapa por la inaceptable economía térmica, debida a las altas temperaturas de salida. Bajo tales circunstancias se recomienda emplear sistemas de secadores por aspersión en 2 etapas o combinados (ver figura 13), donde se combinan con lechos fluidizados actuando como post-secadores o enfriadores (33).

Existen cuatro casos donde se usan sistemas en doble etapa o múltiples (una cámara y un lecho fluidizado) (33):

- Cuando se requieren bajos contenidos de humedad en el polvo. Por ejemplo, cuando se especifican valores menores a 0.1%, y estos niveles no pueden ser obtenidos en un solo secador.
Por tratamiento del producto en condiciones controladas en un lecho fluidizado donde los tiempos de residencia son mucho más grandes que en el secador por aspersión, se pueden obtener niveles de contenido de humedad muy bajos.
- En función de mejorar la economía térmica del proceso. Como ya se sabe al tener un mayor ΔT en el sistema de secado, se tiene una mejor economía térmica. Sin embargo, para muchos productos, el aumentar la temperatura de entrada ocasionaría una degradación en ellos y disminuyendo la temperatura de salida se incrementa la humedad residual o contenido volátil del producto seco. Adoptando un sistema en doble etapa con un lecho fluidizado, el producto se obtiene del secador a una baja temperatura de salida y a un alto contenido de humedad. La temperatura más baja en la salida enfría las partículas, lo que permite usar temperaturas de entrada más altas sin degradación del producto. El polvo con un contenido de humedad más alto, se transfiere al lecho fluidizado donde el secado se completa.
- En casos donde el polvo se debe enfriar a un cierto nivel previamente a su envasado, un lecho fluidizado conectado al secador puede actuar como un efectivo enfriador continuo del polvo.
- Donde se requiere un post-tratamiento, por ejemplo, se puede usar un lecho fluidizado para conducir el post-tratamiento efectivo de un aglomerado o instantanizado.

Un sistema de dos etapas puede operar en un sistema de ciclo cerrado. Si la producción lo requiere, se puede conectar en serie el lecho fluidizado para servicios altamente especializados (33).

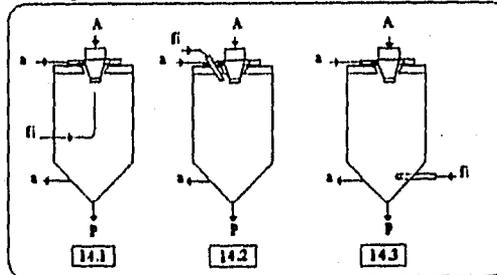
Figura 13. Sistemas de doble o múltiples etapas.



a = Aire.
A = Alimentación.
p = Producto seco

1 = Cámara del Secador por Aspersión.
2 = Ciclón (o recolector seco alternativo).
3a = Lecho fluidizado estacionario.
3b = Lecho fluidizado vibratorio.
4 = Ciclón de Lecho fluidizado (o alternativo).
5 = Ciclón transportador (o recolector alternativo).

Figura 14. Sistemas que involucran retomo de finos.



a = Aire.
A = Alimentación.
fi = finos.
p = Producto seco.

1.1.4.4.e. Sistemas que involucran retorno de finos.

El uso de retorno de finos se aplica en todas las industrias. Ya sea en circuitos multi-etapas o una sola etapa. El retorno de finos promueve un efecto aglomerante el cuál, para productos que exhiben suficientes características de auto-unión o enlace, dirige a la obtención de un polvo grueso en flujo libre, a menudo descrito como polvo libre. La promoción de aglomeración es una ventaja del sistema de retorno de finos. La segunda ventaja es que los finos reciclados regresan al sistema de aspersión creando un circuito con un singular punto receptor. Esto simplifica la operación de manejo del producto, instalada después del secador por aspersión (33).

Hay tres formas para introducir los finos de regreso al sistema de atomización. En la figura 14.1, se muestra que para tener el mejor efecto aglomerante en una cámara utilizando un atomizador rotatorio se inyectan los finos debajo de la rueda atomizadora. A parte de dar un contacto uniforme entre las gotas húmedas desde el atomizador y las partículas finas, este método limita las posibilidades de que los finos secos entren o pasen cerca del dispersor del aire caliente, donde puede ocurrir una degradación térmica. En la segunda técnica consiste en introducir los finos como se muestra en la figura 14.2, los efectos aglomerantes con este sistema no son tan buenos como en el diagrama anterior, ya que la distribución de finos en el asperjado húmedo es siempre unilateral. El sistema mostrado en la figura 14.3, se utiliza cuando los efectos aglomerantes no se requieren, solo el retorno de finos en la cámara para permitir la descarga completa del producto desde la base. (33).

1.1.5. La actividad de agua (aw) en los alimentos.

Una de las variables a controlar en los productos de la deshidratación es la actividad acuosa, para preservar la seguridad y calidad de los mismos; es un método de amplia importancia en la industria alimentaria. Además del valor incierto del criterio de actividad acuosa para la viabilidad biológica, se han reportado valores de aw limitantes para el crecimiento de microorganismos (44).

Los límites más bajos de aw para evitar el crecimiento microbiano dependen además de factores ambientales como la temperatura, el pH, el potencial oxido-reducción, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de inhibidores de crecimiento en el ambiente, y el tipo de soluto empleado para reducir la aw.

A parte de la posible contaminación microbiana, el alimento deshidratado representa un sistema bioquímico concentrado propenso al deterioro por varios mecanismos. Los factores limitantes para la vida útil de la mayoría de estos productos secos son el oxígeno y la humedad, ya sea actuando independientemente o en conjunto.

Esto hace crítico el control del proceso de deshidratación y el subsecuente envasado/empacado y almacenamiento de los alimentos.

1.1.5.1. Medición de la actividad de agua.

La actividad de agua se puede medir, y existen para ello diferentes métodos; los cuales pueden llegar a ser exactos en intervalos hasta de 0.01-0.02 unidades de a_w , clasificándose en las siguientes categorías (44):

1.- Mediciones basadas en propiedades coligativas.

a) Medición de la presión de vapor. Asumiendo que la fugacidad del vapor de agua es aproximadamente igual a su presión, la medición directa de la presión ha sido empleada extensamente para medir a_w en alimentos.

b) Medición de la depresión del punto de congelación. Se han reportado resultados experimentales muy exactos para las técnicas de depresión del punto de congelación en $a_w < 0.85$. La mayoría de éstas se aplican sólo a alimentos líquidos.

Para la medición de presión osmótica y elevación del punto de ebullición no se han reportado aplicaciones para sistemas alimenticios.

2.- Mediciones basadas en psicrometría.

Para determinar actividad de agua, se miden la depresión de bulbo húmedo y el punto de rocío, en termopares psicrométricos junto con higrómetros electrónicos y de cabello. De la medición del punto de rocío, la humedad relativa en equilibrio de la muestra se calcula usando parámetros psicrométricos.

La temperatura del bulbo húmedo indica la temperatura del equilibrio existente entre una mezcla aire-vapor y agua, y depende de la cantidad de humedad presente en la mezcla aire-vapor. La humedad relativa puede determinarse si se conocen las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire en equilibrio con el alimento. Finalmente teniendo la humedad relativa se puede conocer la a_w aplicando la ecuación:

$$a_w = \% \text{ H.R.} / 100 \quad (12)$$

3.- Mediciones basadas en transferencia isopiética.

El método se basa en el equilibrio de las actividades de agua de dos materiales dentro de un sistema cerrado. La transferencia de humedad puede tener lugar a través del contacto directo de ambos materiales, permitiendo así el movimiento de masa, microcapilarmente, y gaseosamente o manteniendo separados los dos materiales, permitiendo así solamente la transferencia a través de la fase gaseosa.

El análisis de la concentración de agua en algún material de referencia (celulosa microcristalina, proteínas) en equilibrio permite la determinación de a_w desde la curva de calibración. No obstante, ésta técnica no es exacta en niveles de $0.5 < a_w < 0.90$.

1.1.5.2. Ajuste de la actividad de agua.

El ajuste de la actividad de agua de muestras de alimentos para un intervalo de valores se realiza con la finalidad de obtener los datos de sorción. Hay dos principales técnicas para ello, éstas son: el método integral y método diferencial.

En el método integral se colocan simultáneamente varias muestras, cada una bajo un ambiente controlado y se mide el contenido de humedad hasta la obtención de un peso constante.

En el método diferencial se utiliza sólo una muestra, que se coloca bajo ambientes que sucesivamente van incrementando o disminuyendo de humedad relativa; el contenido de humedad se mide después de cada equilibrio.

Este método tiene la ventaja de que al usar solamente una muestra, se mantienen todos los parámetros constantes, logrando sólo el efecto de las condiciones del ambiente en los resultados termodinámicos.

Comúnmente se utilizan soluciones saturadas de sales, ácido sulfúrico y glicerol, para generar los ambientes de condiciones definidas en el ajuste de la a_w de alimentos, así como para la calibración en mediciones de a_w . Las más habituales son las soluciones saturadas de sales, están limitadas a que proveen valores discretos de a_w a una temperatura dada. En el cuadro 1 se reportan (44) los valores de humedad relativa en equilibrio para varias soluciones saturadas de sales a diferentes temperaturas. Aunque estos valores no son siempre similares, estas soluciones se han usado generalmente como estándares.

En el ajuste de la actividad de agua en materiales alimenticios, a las muestras de prueba se les permite que alcancen el equilibrio en atmósferas de humedad relativa pre-seleccionada en un espacio mantenido a una temperatura constante. Teóricamente, en equilibrio la a_w de la muestra es la misma que la del ambiente circundante. Sin embargo, en la práctica el verdadero equilibrio nunca se obtiene - para ello se requeriría de un periodo de tiempo infinitamente largo - y el proceso de equilibrio se determina al registrar la diferencia entre pesadas sucesivas de la muestra con valores menores a la sensibilidad de la balanza usada; a éste se le llama el *método gravimétrico*. (27,44). Para acelerar el proceso de equilibrio se sugiere tratar de incrementar el intercambio de humedad mediante una reducción en la distancia física entre la muestra y la solución salina equilibrante, esto reduce la relación entre el volumen espacial y el área superficial de la solución.

Cuadro 3. Actividades de agua de soluciones salinas seleccionadas a varias temperaturas.

sal	Actividad de agua a la temperatura (°C) de:						
	5	10	20	25	30	40	50
Cloruro de Litio	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.1120	0.111
Acetato de Potasio	---	0.234	0.231	0.225	0.216	----	----
Cloruro de Magnesio	0.336	0.335	0.331	0.328	0.324	0.316	0.305
Carbonato de potasio	0.431	0.431	0.432	0.432	0.432	----	----
Nitrato de Magnesio	0.589	0.574	0.544	0.529	0.514	0.484	0.454
Yoduro de Potasio	0.733	0.721	0.699	0.689	0.679	0.661	0.645
Cloruro de Sodio	0.757	0.757	0.755	0.753	0.751	0.747	0.744
Sulfato de Antonio	0.824	0.821	0.813	0.810	0.806	0.799	0.792
Cloruro de Potasio	0.877	0.868	0.851	0.843	0.836	0.823	0.812
Nitrato de Potasio	0.963	0.960	0.946	0.936	0.923	0.891	0.848
Sulfato de Potasio	0.985	0.982	0.976	0.973	0.970	0.964	0.958

Fuente: Thermodynamics of foods in dehydration. S.S.H.RIZVI *et al.* 1986.

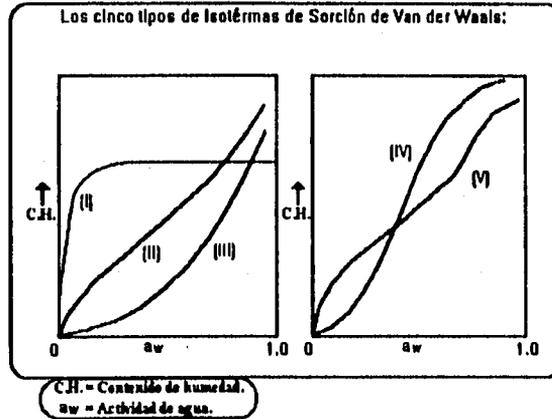
1.1.1.5.3. Isotermas de sorción de humedad.

El contenido de humedad en equilibrio de un alimento correspondiente a una actividad de agua y una temperatura dada, se determina experimentalmente y se representa en la isoterma de sorción de humedad. Ésta, de forma gráfica representa la relación entre el contenido de humedad total y la correspondiente a_w de un alimento sobre un intervalo de valores a una temperatura constante. La a_w y las isotermas de sorción se ven afectadas por la composición del alimento y la temperatura del sistema.

Generalmente, la temperatura tiene efecto negativo sobre el contenido de humedad en equilibrio a bajas actividades de agua. Braunauer en 1940 (44), se basó en la adsorción de gases de Van der Waals sobre substratos sólidos, para clasificar los isotermas de sorción en cinco tipos generales (ver figura 15).

El tipo I sigue la ecuación de Langmuir (44); y la del tipo II es la isoterma de adsorción sigmoidea o de forma S. Los otros tres tipos no tienen nombres especiales, el tipo II y III son muy parecidas a las de tipo IV y V, exceptuando que la máxima adsorción ocurre en algunas presiones más bajas a la presión de vapor del gas. Los isotermas de sorción de la mayoría de los alimentos son no-lineales, generalmente de tipo sigmoideo, y han sido clasificados en los isotermas de tipo II (2,8,9,12,24,27,30,44). Sin embargo, hay alimentos ricos en componentes solubles (como azúcares) que presentan un comportamiento del tipo III. (44).

Figura 15. Clasificación de los isotermas de sorción.



Fuente: RIZVI, S.S.H. ENGINEERING PROPERTIES OF FOODS. ED.M.B. New York. 1986.

Otro comportamiento comúnmente observado es que durante los procesos de adsorción y desorción se siguen diferentes patrones, dando como resultado una *histeresis*. (27,30,44). Esta se define de la diferencia en que se retiene más humedad en los procesos de desorción comparados con los de adsorción a una humedad relativa de equilibrio dada.

1.1.5.4. Descripción de isotermas de sorción.

Se han sugerido varias ecuaciones de modelos diferentes para describir los isotermas de sorción de humedad en alimentos. No obstante, se ha notado que ningún modelo logra ajustar completamente el amplio intervalo de a_w , debido a que el agua está asociada en la matriz del alimento por diferentes mecanismos en diferentes regiones activas. La a_w de un alimento se aproxima a regiones de multicapa, que dirige un mecanismo de equilibrio dado; con lo cual las manifestaciones de histeresis dificultan el establecer una isoterma de sorción universal para un producto particular. Por lo tanto, algunas isotermas requieren de una descripción matemática mediante ecuaciones semi-empíricas con dos o tres parámetros de ajuste. Se debe tener en cuenta que un buen ajuste de un modelo a los datos experimentales muestra solo una calidad matemática y no la naturaleza del proceso de sorción (1,8,9,27,30,44).

Los modelos usados para describir la sorción de agua en alimentos (1,2,8,9,12,24,27,30,44) son:

1. La ecuación Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T.). La ecuación de B.E.T. es el modelo más ampliamente usado, ya que da un buen ajuste a los datos para una variedad de alimentos sobre la región de $0.05 < a_w < 0.45$ (1,9).

Esta proporciona un valor estimado de la humedad adsorbida en la superficie de monocapa. Este valor en monocapa ha sido reportado como el correspondiente a la estabilidad física y química del alimento deshidratado. Sin embargo, la teoría de esta ecuación hace demasiadas suposiciones en las cuales se considera una superficie adsorbente uniforme y la ausencia de interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas, otras suposiciones son que: (1) La velocidad de condensación de la primera capa es igual a la velocidad de evaporación de la segunda capa, (2) La energía de unión de todos los sitios de adsorción sobre la primera capa es la misma, y (3) La energía de unión de las otras capas es igual a aquella del disolvente puro.

La ecuación se expresa generalmente de la siguiente forma:

$$aw/(1 - aw)M = 1/CM_0 + (C - 1) aw/CM_0 \quad (13)$$

Las constantes M_0 y C son estimadas de la linearización de la ecuación.

b. La ecuación Oswin. Es un modelo basado en las series de expansión de Pearson para curvas de forma sigmoidal y aplicada a isotermas del tipo II por Oswin. Ha sido reportada por algunos autores (2,8,12,44,48), como una isoterma típica de los alimentos deshidratados. Su aplicación ha funcionado en leche descremada en polvo y té secado por congelación (22,29,54), un estudio realizado en 1972 por Labuza (44) en intervalos de aw por arriba de 0.5.

La ecuación esta dada como:

$$M = C_1 (aw / 1 - aw)^n \quad (14)$$

Donde C_1 y n son constantes.

c. La ecuación Guggenheim-Anderson-de Boer. (G.A.B.). Fundamentalmente, ésta representa una extensión refinada de las ecuaciones de Langmuir y de la teoría B.E.T., contiene tres parámetros. Está expresada matemáticamente por:

$$M/M_0 = CKaw / [(1 - Kaw)(1 - Kaw + CKaw)] \quad (15)$$

Donde C y K son constantes relacionadas con las energías de interacción entre la primer molécula y la más distante adsorbidas en los sitios individuales de sorción. Teóricamente, estos están relacionados a las entalpias de sorción como sigue (44):

$$C = c \exp[(H_1 - H_0)/RT] \quad (16)$$

$$K = k \exp[(H_1 - H_0)/RT] \quad (17)$$

Donde H_0 , H_n y H_l , son las entalpías de sorción molar de la monocapa, la multicapa, y el líquido, respectivamente.

Esta teoría G.A.B. tiene las mismas suposiciones de la adsorción física localizada en multicapas sin interacciones laterales. Sin embargo, al incorporar el parámetro K se asume que las moléculas en la multicapa tienen interacciones con el sorbente en un intervalo de niveles de energía entre aquellos de las moléculas en monocapa y del líquido puro.

Las mayores ventajas del modelo son que: (1) Tiene un campo teórico viable, (2) Describe el comportamiento de sorción de casi todos los alimentos desde cero hasta 0.9 de a_w , (3) Tiene un sencillo cálculo la forma matemática con sólo tres parámetros, (4) Puede describir algunos efectos de la temperatura sobre las isotermas mediante ecuaciones del tipo Arrhenius.

Existen muchos modelos más para la descripción teórica de las isotermas de sorción (2,8,12,24,27,30,37,44, y 48). Pero solamente se mencionaron los más aplicables en alimentos y los utilizados en ésta investigación.

1.1.5.5. El calor isostérico de sorción.

La constante en las ecuaciones de isotermas de sorción de humedad, nos representan una función de la temperatura, y es usada para calcular la dependencia térmica de la actividad de agua. La ecuación que más se ha utilizado para predecir el valor de a_w a cualquier temperatura es la de Clausius- Clapeyron (27,44), esto si se conocen el calor isostérico y la a_w a una temperatura.

La ecuación de vapor de agua en términos de calor isostérico (Q_{st}) es:

$$d(\ln P) = - (Q_{st}/R)d(1/T) \quad (18)$$

Restando la relación correspondiente para vapores en equilibrio con agua pura a la misma temperatura produce:

$$d(\ln P) - d(\ln P^*_w) = - [(Q_{st} - \Delta H_{vap})/R]d(1/T) \quad (19)$$

En términos de actividades de agua, a_{w1} y a_{w2} a las temperaturas T_1 y T_2 , la relación anterior da:

$$\ln(a_{w2} / a_{w1}) = (q_{st}/R) [1/T_1 - 1/T_2] \quad (20)$$

Donde q_{st} = Calor isostérico neto de sorción (también llamado exceso de calor de sorción) = $Q_{st} - \Delta H_{vap}$.

Para estimar el valor de q_H se requiere de medir actividades de agua a diferentes temperaturas en el rango de interés, al menos se necesitan datos a dos temperaturas.

El uso de la ecuación anterior debe hacerse bajo las siguientes suposiciones (44) :
(1) Que el contenido de humedad del sistema en consideración permanece constante y (2) Que la entalpía de vaporización del agua pura (así como el calor isostérico de sorción) no cambia con la temperatura. La evaluación con datos experimentales de esta ecuación se ha realizado en un intervalo de 40-80° C (2,8,9,12,24,27,30,44), presentando un ajuste aceptable.

1.2.GENERALIDADES DE LA INGENIERIA DE CALIDAD.

1.2.1. El control de calidad.

Dentro del marco teórico que encierra la ingeniería de calidad, se encuentran los elementos y conceptos que a continuación se mencionan, con los cuales se pretende iniciar el entendimiento de la importancia de los métodos y técnicas para controlar la calidad de un producto y/o proceso.

El concepto de calidad.

Generalmente, la palabra *calidad* se relaciona con los beneficios o satisfacción proporcionada por un producto en medidas commensurables para el consumidor.(4,18).

Una definición de este término es la siguiente: "La calidad es la resultante de las características del producto y su servicio, ingeniería, fabricación y mantenimiento, a través de los cuales el producto de uso satisfaga la esperanza del cliente o consumidor".(18).

Así, la calidad es considerada como un valor (no precisamente como pérdida), pero el término valor es muy subjetivo por lo que la calidad se relaciona con problemas de clasificar y determinar el valor de un producto en la sociedad, esto a nivel mercado y planeación de un producto.

La calidad de un alimento se ha definido como el conjunto de características de comestibilidad y asequibilidad que lo hacen atractivo a un cliente específico. Por tal motivo, al evaluar la calidad de un producto alimenticio se hace referencia a factores o características susceptibles de medir que aporten la información apropiada para poder inferir sobre los fenómenos de transferencia que se presentan en un proceso, ver si se ajusta o no a un procedimiento adecuado, o si está dentro de la norma para ejercer el control sobre el mismo.(4).

El concepto de control.

El término control tiene su definición dentro del área de producción de cualquier empresa, generalmente como: "El procedimiento por el cual se logra alcanzar la(s) meta(s) industrial(es) de calidad". Para establecer un control se requieren de los siguientes cuatro pasos:

- 1.- Establecimiento de estándares,
- 2.- Estimación de conformidad,
- 3.- Ejercer acción cuando sea necesario, y
- 4.- Hacer planes para el mejoramiento.

Por lo anterior, el control de calidad se puede definir como el proceso para mejorar la calidad de un producto de acuerdo a normas y/o estándares para favorecer el gusto del cliente. Mientras, el control total de la calidad se define como el proceso que le da efectividad genuina al control del producto desde que se inicia con el diseño del producto hasta que está ya en manos del consumidor.

Dentro de las funciones que se desempeñan en el control de calidad de los productos procesados, se encuentra el aseguramiento de calidad, que consiste en establecer la conformidad de que el producto diseñado cumple con todas las características que se establecen legalmente con la finalidad de que se asegure la más propicia calidad para complacer al consumidor.

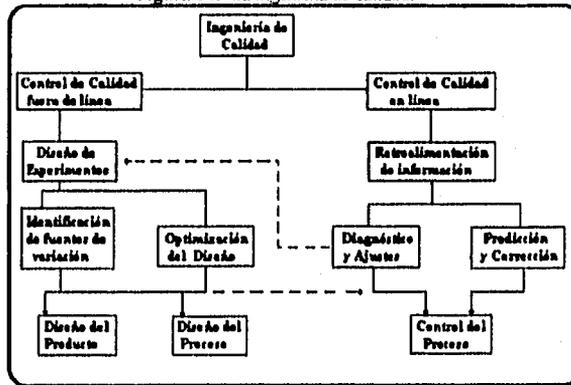
1.2.2. La ingeniería de calidad.

La ingeniería de calidad engloba toda la filosofía de calidad total (18). Su marco de trabajo interrelaciona con los papeles de la ingeniería de diseño y la manufactura.

Esta contiene las actividades de control de calidad (dirigidas a reducir las pérdidas causadas por la variación) que constituyen cada fase de la investigación y desarrollo del producto, diseño del proceso, producción y satisfacción del consumidor (18,19). El papel de cada una de estas actividades es proveer de todos los objetivos de mejoramiento continuo, descubrimiento acelerado, rápidas soluciones a problemas, y efectividad de costos mientras se mantiene la calidad.

Para proveer estos objetivos, la Ingeniería de calidad puede ser dividida en dos categorías: (1) El control de calidad en línea, y (2) El control de calidad fuera de línea. (ver figura 16.).(19)

Figura 16. La ingeniería de calidad.



Fuente: GILLENSTUART P. TAGUCHI METHODS. A HANDS-ON APPROACH. Ed. A.W. P. Co. México. 1993.

1) El control de calidad en línea.

Está involucrado con la producción actual del producto. Estas son las técnicas de monitoreo en la producción, mediciones sobre la calidad, proveer señales de problemas potenciales y acciones correctivas directas. Los sistemas de retroalimentación de información sirven de fuente para notificarles al operador y al supervisor de producción sobre el funcionamiento del proceso.

Lo anterior es importante ya que se necesita registrar los datos iniciales y durante el proceso productivo para que al analizarlos se determine si el conjunto de condiciones del proceso está siendo mantenido apropiadamente. Se logra esto mediante la comparación de estos datos con los valores estándares deseados, que generalmente se conocen en cada proceso. Si el análisis indica que las condiciones no son aceptables, los ajustes a realizar deben regresar el proceso dentro de un intervalo aceptable.(19)

Por ello es necesaria la existencia de funciones de predicción y corrección que soporten y reaccionen a los diagnósticos de entradas y ajustes. La magnitud de los ajustes puede determinarse para las correcciones hechas.

Otras consideraciones dentro del Control de Calidad en línea incluyen al mantenimiento preventivo, la calibración de sensores, e inspección económica. Cada una de estas funciones contribuye y da como resultado un control de proceso con costos efectivos.(19).

2) El control de calidad fuera de línea.

El propósito de éste es optimizar el diseño del producto y del proceso en apoyo al control de calidad en línea. El diseño de experimentos es la herramienta fundamental en el control de calidad fuera de línea. Algunos de estos aportes pueden ser actividades de investigación y desarrollo.

Las técnicas de experimentación juegan dos papeles importantes: (1) Identificar las fuentes de variación y (2) Determinar el diseño y optimización del proceso. Identificar los principales contribuyentes a la variación total puede enfocar la atención sobre los más importantes factores que afectan la *variación funcional* y diversos aportes de aquellos factores que tienen un mínimo impacto sobre la calidad total del producto a obtener. (18)

La determinación de los mejores niveles de estos factores críticos establece los valores estándar para las actividades de control de calidad en línea y provee soluciones a problemas identificados en producción.

Describiendo desde un punto de vista funcional, el control de calidad fuera de línea puede además ser visualizado como tres etapas consecutivas para *optimizar* un producto o proceso. Estas son: (1) Sistema de diseño, (2) Parámetros de diseño, y (3) Tolerancia de diseño. (19).

1) Sistema de diseño.

Se puede definir como la etapa fundamental de cualquier desarrollo de un nuevo producto o innovación de un proceso. Es una etapa de ideas, donde los conceptos pueden ser basados en experiencias pasadas, conocimientos científicos/ingenieriles, una nueva revelación, o una combinación de las tres. La estrategia detrás del sistema de diseño es tomar estas nuevas ideas y convertirlas en algo que se pueda trabajar.

2) Parámetros de diseño.

El objetivo de estos es tomar la innovación, la cuál ya ha sido trabajada en el sistema de diseño y exaltada para ser consistentemente funcional para intentarse. El interés del Dr. Taguchi, (18,19) ha sido, hacer el producto y el proceso *robusto* contra las influencias incontrolables (*ruido*) que pueden prevenirse funcionando apropiadamente.

La herramienta para alcanzar los objetivos de los parámetros de diseño es el diseño de experimentos. La estrategia detrás de estos está basada en consideraciones de costos, de aquí surge la idea de hacer el "mejor" diseño con el "menor" costo.

1.2.3. Metodos Taguchi, herramientas básicas.

El propósito buscado al experimentar empleando la metodología Taguchi es identificar aquellos factores llave que tienen la mayor contribución a la variación y averiguar aquellos ajustes o valores que resultan en una menor variabilidad. La metodología enfatiza en la variación funcional, la cuál se puede medir en términos de función del producto, además de estar relacionada con la funcionalidad propia del producto o del proceso que manufactura el resultado final.

En los métodos desarrollados para entender mejor las influencias sobre la funcionalidad de productos y procesos asociados, el Dr. Taguchi ha sido reconocido por sus tres mayores contribuciones en el campo de calidad, que son:

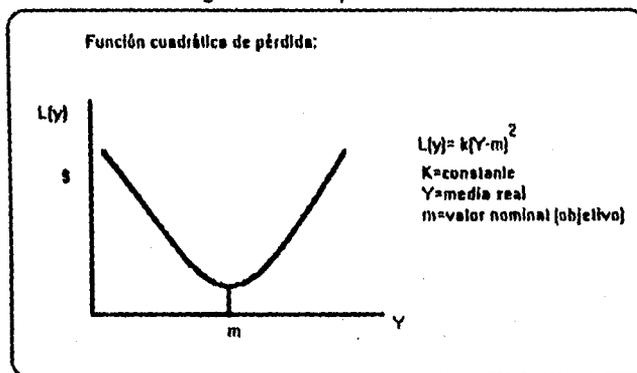
- I) La función pérdida.
- II) Los arreglos ortogonales y gráficos lineales, y
- III) La Robustez.

I) La función pérdida.

Debido a la importancia de costo después de la guerra de Japón, se estableció una unión directa entre la calidad y la rentabilidad colectiva. Usando las series de expansión de Taylor, Taguchi desarrolló un modelo matemático en el cuál las pérdidas son una función cuadrática de la desviación de la calidad de interés desde su valor objetivo.

En la figura 17. Se representa esquemáticamente la función matemática de pérdida desarrollada por Taguchi. (19).

Figura 17. Función pérdida.



Fuente: GLEN STUART P. TAGUCHI METHODS. A HANDS-ON APPROACH. Ed. A.W. P. Co. México, 1993.

II) Arreglos ortogonales y gráficos lineales.

Posiblemente es la metodología de mayor uso en los diseños experimentales de los proyectos de interés en ingeniería. El desarrollo de los arreglos ortogonales y la selección del correspondiente gráfico lineal, viene a convertirse en la herramienta básica de eficiente planeación, diseño, conducción y análisis de experimentos.

Los Arreglos Ortogonales.

Originalmente se desarrolló la adaptación de los arreglos ortogonales para diseñar experimentos eficientes y el análisis de datos experimentales, en Inglaterra por Fisher, R.A. (18,19) controlándose los errores experimentales. Taguchi empleo estos arreglos ortogonales no sólo para medir el efecto de un factor sobre el resultado promedio, sino también para determinar la variación de la media.

La primer ventaja que proporcionan estos arreglos es la interrelación entre los factores bajo investigación. Para cada nivel de cualquier factor, todos los niveles de los mismos factores ocurren en un igual número de veces. Esto constituye un experimento balanceado, de donde se deriva el término ortogonalidad al arreglo, y que permite que el efecto de un factor en estudio sea separado de los efectos de otros factores, dando como resultado que los hallazgos del experimento son reproducibles. (18,19).

Otra ventaja adicional es su eficiencia en costos. Debido a que es balanceado, el diseño de un arreglo ortogonal no requiere que todas las combinaciones de todos los factores sean probadas. Entonces, la matriz experimental puede ser la más pequeña posible sin perder alguna información vital; ofreciéndose así, un experimento eficiente y costeable para ser ejecutado. (Por ejemplo: un L_8 requiere de sólo 8 corridas experimentales y puede incorporar hasta 7 diferentes factores, como se observa en el cuadro 4). Además, el diseño de experimentos empleando los arreglos ortogonales resulta ser simple y de un lineamiento fácil de seguir.

Para facilitar el entendimiento de los arreglos ortogonales es necesario entender la nomenclatura estándar que se utiliza para describirlos. Cada Arreglo puede ser identificado por la forma $L_A(B^C)$ e ilustrado por el cuadro 4. El subíndice A, representa el número de corridas experimentales o combinaciones de los factores que pueden ser conducidos en el experimento. B indica el número de niveles dentro de cada columna. La C, mostrada como el exponente de la letra B, esta identificando el número de columnas disponibles dentro del arreglo ortogonal.

Cuadro 4. Arreglo ortogonal $L_8(2^7)$.

No.	Columnas (Factores)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	2	2	1
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Filas

Un arreglo ortogonal $L_8(2^7)$, es muy flexible para investigar interacciones con los factores. Una combinación de hasta siete factores e interacciones pueden ser incorporada dentro del arreglo.

Los arreglos ortogonales también disponen, para la vasta mayoría de propósitos, de dos o tres niveles que resultarán suficientes. El usar un arreglo que posea dos o tres niveles dependerá de nuestro objetivo y estrategia correspondiente.

Para realizar una elección acertada de la serie de arreglo ortogonal a emplear 2^n o 3^n , el cuál permita ser el menor y proveer de la información necesaria, es indispensable calcular los grados de libertad requeridos.

Los grados de libertad.

Estos se pueden considerar como una medida de la cantidad de información concerniente a algo de interés que puede ser obtenida. Generalmente se han definido como: " El número de comparaciones que se necesitan hacer sin ser redundante para derivar una conclusión" (18,19). Otra definición relacionada es: " El número de comparaciones entre los niveles de un factor o interacción que necesitan hacerse para determinar cuál nivel es mejor y específicamente que tanto mejor es".(19).

Para entender la interrelación entre un factor experimental y la característica de calidad de interés, necesitamos hacer comparaciones entre los valores de la característica de calidad a diferentes niveles del factor en estudio.

Al hacerlas nos dirán si el factor tiene un mayor impacto sobre la característica de interés y cuál nivel o conjunto de valores nos da el resultado deseado. Estas comparaciones se deben transformar matemáticamente en grados de libertad.

Para calcular los grados de libertad requeridos para los factores e interacciones que están disponibles dentro de cada arreglo ortogonal, se aplican algunas reglas simples y fórmulas básicas.

Los grados de libertad requeridos para un factor en estudio es igual al número de niveles a manejar dentro del experimento menos uno. Es decir:

$$\text{Grados de libertad de un factor} = \text{Número de niveles} - 1.$$

Los grados de libertad para una interacción de dos factores A y B se calcula como un producto cruzado (A x B). Por lo tanto:

$$\text{Grados de libertad de interacción (A x B)} = (\text{Número de niveles del factor A} - 1) \times (\text{Número de niveles del factor B} - 1)$$

Otro cálculo importante es determinar los grados de libertad de un arreglo ortogonal, lo cual se hace aprovechando la nomenclatura que describe a cada arreglo ortogonal; Como los grados de libertad disponibles por columna es igual al número de niveles dentro de cada columna menos uno, los grados de libertad totales para el arreglo entero es igual a la suma de los grados de libertad individuales para cada columna. Utilizando la forma $L_N(B^C)$, los grados de libertad se calculan por:

$$\text{Grados de libertad por columna} = \frac{(B - 1) \times C}{\text{Número de Columnas}} = \text{Grados de libertad}$$

Por ejemplo: Los grados de libertad para un $L_8(2^7)$ se calcula como:

$$\text{Grados de libertad por columna} = \frac{(2 - 1)}{\text{Número de Columnas}} = 7$$

$$\text{Grados de libertad totales} = (2 - 1) \times 7 = 7.$$

Para asignar apropiadamente las columnas de un arreglo ortogonal a los factores e interacciones de estudio y así obtener resultados reproducibles, se explican los gráficos lineales a continuación.

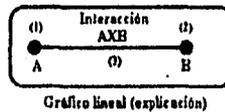
Los gráficos Lineales.

El gráfico lineal es incorporado por Taguchi para dar flexibilidad al arreglo ortogonal. Esta es una representación gráfica del arreglo ortogonal para asignar los factores bajo investigación y las interacciones correspondientes entre estos (18,19). De este modo, se pueden estudiar efectivamente las interacciones entre los factores experimentales así como los efectos de cada factor de forma individual.

Por lo tanto, el gráfico lineal se define como el esquema lógico para la asignación de las interacciones de un arreglo ortogonal sin confundir el efecto de estas interacciones con los efectos de los factores individuales a estudiar.

Los gráficos lineales están contruidos de nodos o círculos (ver figura 18), cada uno de los cuales representa una columna dentro del arreglo ortogonal en la cual un factor puede ser asignado. Las líneas de conexión representan la interacción entre los dos factores (representados por los círculos) en cada extremo del segmento de línea. El número que acompaña el segmento de línea se refiere a la columna dentro del arreglo en la cuál la interacción debe ser asignada.

Figura 18. Explicación del gráfico lineal.

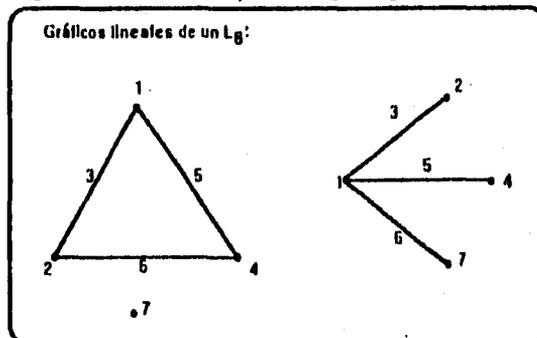


Dependiendo del tamaño del arreglo ortogonal, los gráficos lineales varían en complejidad y puede haber sólo uno o múltiples gráficos lineales disponibles para cualquier arreglo ortogonal específico.

Existe una secuencia propuesta para asignar adecuadamente los factores en los gráficos lineales (consultar anexos), los pasos generales son:

1. Seleccionar el arreglo ortogonal.
2. Dibujar el gráfico lineal requerido.
3. Comparar el gráfico lineal requerido con un gráfico lineal estándar. (ver figura 19).
4. Redibujar el gráfico lineal requerido.
5. Asignación de los factores e Interacciones
6. Comparación de esquemas alternativos entre los gráficos estándar (si es apropiado).

Figura 19. Gráficos lineales para un arreglo ortogonal $L_8(2^7)$.



Fuente: GLEN STUART II: TAGUCHI METHODS, A HANDS-ON APPROACH. EL A.W. P. Co. México 1991.

Usando el conocimiento ingenieril y la experiencia, se pueden incorporar dentro del experimento aquellas interacciones que tengan mayor oportunidad de tener un efecto fuerte sobre el producto y/o proceso. Esto provoca que la matriz experimental permanezca altamente eficiente, efectiva y costeable, mientras que las conclusiones extraídas serán consistentemente reproducibles.

III) La Robustez. (4.18,19)

Este concepto se puede definir tanto para el producto como para el proceso relacionado desde el siguiente punto de vista:

Producto : La habilidad del producto de funcionar consistentemente como diseñado con el mínimo efecto de cambios en influencias de operación incontrolables.

Proceso : La habilidad de un proceso para producir un producto consistentemente bueno con el mínimo efecto de cambios en influencias incontrolables de manufactura.

Se debe reconocer que no siempre se pueden controlar algunas de las cosas que crean variación entre el proceso y el producto. Un factor de ruido puede denotar condiciones ambientales (ruido externo, como el tiempo, que no es controlable), deterioración interna (ruido interno), o variación de una unidad a otra (ruido entre producto). (19).

El propósito de dar valores a los niveles de factores de ruido es para simular la variabilidad en los factores de ruido y consecuentemente asegurar la robustez a esta variabilidad. Se deben ampliar los rangos de variabilidad en factores de ruido en los cuales la característica de calidad tenga un cambio mínimo. Por lo general, se seleccionan aquellos niveles que están en los extremos de los rangos típicos. En la mayoría de los casos, al manejar variables continuas, el fijar un valor límite mínimo y otro máximo es suficiente para asegurar la robustez.

Es importante definir previamente e incluir los factores de ruido potencialmente fuertes, ya que un producto o proceso será robusto en los niveles más bajos de los mismos. Además, esto conforma el experimento en un tamaño menor y reduce sus costos.

Un método aplicable consiste en combinar los factores de ruido inherentes a un proceso; si se realiza un experimento con la mejor y la peor combinación de los valores de nivel de ruido, se puede hacer robusto al proceso en cualquier combinación intermedia entre estos dos extremos.

La relación señal-ruido es una de las contribuciones más importantes del Dr. Taguchi a la ingeniería de calidad; ya que se usa como una herramienta para determinar robustez, ésta relación es un componente esencial en el diseño de parámetros.

La relevancia de la ecuación de relación es que el numerador o señal se interpreta como la disponibilidad del proceso de obtener un buen producto o de que el producto funcione correctamente. Al incluir como denominador al impacto de los factores de ruido, podemos adaptar esta relación como un barómetro de posibilidad del sistema de un buen funcionamiento en relación al efecto del ruido.

Aplicando adecuadamente ésta relación a un experimento, se fijarían los valores de los factores de control que nos producen un mejoramiento (señal alta) en un proceso o producto mientras se minimizarían los efectos de las influencias incontrolables (ruido bajo). En general, para obtener un mejoramiento del proceso o producto debemos buscar el incremento de la relación señal-ruido.

El Análisis de Métodos Taguchi.

El tipo de análisis a aplicar a los datos experimentales podría ser dictado desde el diseño de experimentos. Se pueden categorizar los diferentes diseños en términos de los tipos de las características de calidad a evaluar en el producto/proceso y los factores de ruido involucrados. Para poder guiarnos en la determinación de las características de calidad apropiadas, es de utilidad ubicarlas dentro de los siguientes grupos:

1. Características medibles.
2. Características por atributos y
3. Características dinámicas.

1.- Características medibles.

Son aquellos resultados finales que pueden ser medidos en una escala continua. Algunos ejemplos pueden ser: Dimensiones, peso, presión, volumen, temperatura, densidad, viscosidad, % de humedad, etc.

Dentro del grupo de las características medibles podemos sugerir una subdivisión en características Nominal-mejor, Menor-mejor, y Mayor-mejor.

Características Nominal-mejor.

Se refiere a aquellas características con un objetivo numérico específico o un valor estándar. Las dimensiones son típicas de esta subdivisión (alto, largo, ancho, espesor, diámetro, etc.).

Características Menor-mejor.

Son aquellas cuyo objetivo principal es obtener el valor más bajo posible, llegando a cero como el deseado. (por ejemplo, residuos, deterioro de producto, impacto de daño). Los defectos no están definidos típicamente como características medibles una vez que se ubican como discretas en la naturaleza.

Características Mayor-mejor.

Al contrario de las características Menor-mejor, el objetivo de éstas es obtener el valor más alto posible. (Por ejemplo, Robustez, vida útil).

2. Características por atributos.

Estas características no pueden ser medidas sobre una escala continua, consisten en clases que pueden ser agrupadas o clasificadas en una escala graduada discreta.(19).

Frecuentemente están basadas en apreciaciones subjetivas tales como: Bueno, mejor, el mejor; o Bien: Aceptable, no aceptable.

3. Características dinámicas.

Son las más difíciles y complejas de las tres categorías, es en términos generales una representación funcional de el proceso inicial estudiado. Dentro de este contexto, el proceso es visto como un proceso dinámico descrito por una entrada o señal y por una salida resultante o resultado final; que es resultado de esta señal. Una forma es ver al proceso como un sistema que involucra transferencia de energía desde la entrada a la salida.(por ejemplo, Control de temperaturas de un cuarto).

Al definir la característica de calidad como una variable continua, la técnica más apropiada en la interpretación de los datos es el análisis de promedio por niveles.

Análisis de promedio por niveles.

Esta técnica determina la respuesta promedio por cada nivel de factor e interacción y analiza la importancia de los factores e interacciones basándose en estos valores. Su objetivo principal es identificar los efectos más fuertes y determinar la combinación de factores e interacciones investigadas que pueden producir los resultados más deseados.(18,19).

En general, la estrategia seguida es calcular los resultados experimentales promedio para cada nivel de cada factor o interacción, el impacto de cada factor puede ser determinado por análisis tabular o gráfico.

Realizarlo por ambos modos resulta ser más completo. Una vez que se eligen los factores de mayor efecto y sus respectivos niveles, se calculan los resultados predichos basándose en el impacto de los efectos importantes sobre los resultados experimentales. Puede realizarse una corrida confirmatoria para comparar los resultados con los predichos con lo cual se verifica el análisis y se confirman las suposiciones hechas en el diseño experimental.

Cuando se establece la característica de calidad en términos de atributos, la técnica más adecuada en la interpretación de resultados es el análisis de atributos clasificados.

Análisis de atributos clasificados.

Para poder aplicar un procedimiento y formato similar al análisis de promedio por niveles, se debe primero obtener muchas más unidades por corrida experimental para conseguir una información equivalente. En seguida, los resultados se sortean y totalizan para cada clasificación, este paso los transforma en grupos separados de información tales como manzanas y naranjas que no pueden combinarse; de este modo los datos pueden ser adicionados juntos y obtenerse así, una respuesta promedio (19).

El análisis está basado estrictamente sobre el efecto de aquellos parámetros del proceso y componentes del diseño que han sido definidos como factores de control potencialmente importantes.(19). Los resultados de cada nivel de un factor se comparan contra otro y las diferencias matemáticas son la medida de fuerza de tales factores. Y al igual que en la técnica de análisis de promedio por niveles, la importancia de un factor está otra vez basada en la magnitud relativa del efecto en relación a la de otros factores involucrados. Se puede estructurar una ecuación de predicción en la cual sólo se incluyan los factores con fuerte influencia, para realizar la comparación con los resultados de una corrida confirmatoria, que ayude a verificar y comprobar el análisis.

Cuando se conforma la característica de calidad dentro de alguna categoría de Menor-mejor, Mayor-mejor, o Nominal-mejor, se tienen otras técnicas de análisis.

En el análisis de características Menor-mejor, se incorporan los factores de ruido, de tal manera que hace al experimento mucho más completo ya que no sólo permite determinar los factores llave y los mejores valores sino también los mejores niveles del factor que consistentemente dan un buen funcionamiento sobre el tiempo y aquellos elementos que no tienen un cambio controlado.

Esta capacidad puede aplicarse al mejoramiento del proceso que manufacture un buen producto y al diseño de productos que funcionarían bien dentro de diversas aplicaciones y condiciones ambientales.(19).

La técnica de análisis es similar al análisis de promedio por niveles. La diferencia fundamental es que en lugar de usar la respuesta media como una medida de bueno o malo, se utiliza la relación señal-ruido. Una consideración adicional en esta estrategia es la influencia de factores de ruido, ya que al no ser variables de control se debe evaluar la posición del análisis si el efecto de estas influencias es también grande.

Las técnicas de análisis de características Mayor-mejor no son muy lejanas a la empleada para las de Menor-mejor. Sin embargo, la diferencia es fundamental en la forma de determinar la relación señal-ruido, que aún cuando en ambos casos es una función logarítmica, la ecuación para calcular la desviación media cuadrática es diferente. Aquí, el término de robustez es aplicable para conseguir respuestas Mayor-mejor elevadas para el funcionamiento del proceso y la funcionalidad del producto final.

Para el análisis de una característica de calidad Nominal-mejor, se debe tener una técnica diferente, primero de los datos experimentales se debe reducir la variabilidad con respecto al valor nominal establecido, de este modo se identifican los factores que más influyen en la variabilidad, esta información permite determinar los niveles de los factores que dan la menor variabilidad y que están menos afectados por el ruido.

Después de reducir la dispersión de los datos, se necesita ajustar la media; esto se logra enfocándose en aquellas variables que tienen un efecto significativo sobre el resultado promedio pero con un pequeño o nulo impacto sobre la variación; entonces, se mueve la distribución de los datos sin distorsionar la dispersión o forma de los resultados. Una vez seleccionado, el valor del factor de ajuste puede ser modificado hasta que el centro proyectado de la distribución de datos sea alineado con el valor objetivo. Esto asume una relación lineal entre el factor de ajuste y la característica de calidad y refuerza la importancia del conocimiento de ingeniería en la selección de los factores a incorporar en el experimento.

En éste análisis la relación señal-ruido es una función logarítmica de la variabilidad en relación al porcentaje de cambio en la media.(19).

Por último, al intentar analizar los datos de una característica dinámica, el concepto de las relaciones señal-ruido se asemeja a la consideración de que las desviaciones de los resultados deseados son consecuencia de efecto del error inducido. La aplicación de esta técnica se desarrolla ampliamente para los sistemas de medición, donde se relaciona la sensibilidad por unidad de señal (entrada) con el error de medición, el objetivo es conseguir un sistema capaz de proporcionar información precisa. También para los sistemas de manufactura donde la sensibilidad del sistema por unidad de señal (entrada) se relaciona con la variabilidad en la salida obtenida o producto final.

Hay que mencionar que la sensibilidad se refiere a la cantidad de cambio en la salida resultante basada sobre los cambios en la señal de entrada. (19).

La selección de los niveles de factores considerados debe basarse en la variabilidad mínima conforme cambia la señal de entrada y la robustez al ruido, es decir, no solo deben de producir los resultados más cercanos a uno específico para una señal de entrada, sino producir resultados más próximos a la respuesta de salida proyectada por cada valor de señal de entrada. Lo importante es clasificar los factores de señal porque de aquí las técnicas y cálculos asociados con el análisis de características dinámicas cambian para los diferentes tipos de factores de señal.

1.3. APLICACION DEL SECADO POR ASPERSION EN:

1.3.1. Extractos Naturales y Sintéticos.

Las aplicaciones del secado por aspersión plantean un amplia gama de productos entre los que se encuentran extractos naturales y sintéticos.

Entre los sintéticos una gran variedad de productos aromáticos y saborizantes son deshidratados para su comercialización como aditivos alimenticios en productos formulados como gelatinas, pudines, mousse, dulces, bebidas y sabores como fresa, chocolate, naranja y algunos condimentos.

Entre los extractos naturales, estos son una cantidad reducida debido al alto costo de su extracción a partir principalmente de materiales vegetales y su uso sin limitantes como el caso de aceites esenciales, extractos de café y extractos de yuca entre otros. Este último derivado de hortalizas y con aplicaciones tanto en la industria farmacéutica, química y alimentaria dado a sus propiedades particularmente las espumantes.

El extracto de Yuca.

La aplicación del secado por aspersión al extracto de yuca, no se ha realizado y no se reportan datos bibliográficos al respecto.

A) Descripción :

Nombre botánico : *Manihot Esculenta* , Cratz.

Sinonimia : *Manihot utilisima* , Pol, *Manihot manihot* , Karst.

Familia : Euphorbiaceae.

Nombre común : Yuca . yuca brava , guacamote.

La *Manihot esculenta* es un pequeño arbusto de 1.5 a 3 metros de altura , perennifolio, originaria de Brasil . Se cultiva en diversas regiones desérticas y tropicales de México.(38,45).

El extracto de yuca se obtiene de las plantas en el desierto de Mojave (Baja California) y se procesa a través de una filtración lo cual forma una emulsión agua-aceite biológicamente estable. Contiene saponinas y glucósidos, que genera espuma cuando se agita fuertemente con agua. Estos contribuyen a que el olor mismo del extracto no permanezca cuando se usa en los niveles recomendados. Es completamente soluble en soluciones acuosas y estable en un intervalo de pH de 2 a 10. (43)

B) Usos :

De las semillas de varias especies del género *Yuca* de la familia de las Liliáceas, se han aislado aceites en buen rendimiento.

Earle (38) encontró que las semillas de *Yucca eleata* contienen 29 % de aceite en cuya composición predomina el ácido linoléico (52 %), éste aceite tiene un índice de yodo de 128. Las semillas de *Y. Filifera* contienen un 29 % de aceite cuya composición predomina notablemente el ácido linoléico (70 %) y siguiendo en orden de importancia el ácido oleico y ácido esteárico; tiene un índice de yodo de 150. (38).

Los aceites de *Y.constricta* y de *Y. glauca*. tuvieron índices de yodo de 128 y 142 , respectivamente.(38)

Tradicionalmente se han empleado las hojas de diversas especies de *yuca*s como productoras de fibras duras usadas en la industria textil. Para ello se han empleado la *Yucca elata*, *Y. glauca*, *Y. Bacata* y *Y. Torrei*.; sus hojas una vez secas, contienen entre 40 y 45 % de fibra .(45).

Principales productos y utilización.

Su principal producto es la raíz , de la cual se obtiene almidón , tapioca y miel .Si se come cruda , la raíz es sumamente venenosa ya que contiene de 0.001 a 0.04 % de ácido cianhídrico. Esta sustancia es tan activa que 0.065 gramos es suficiente para matar a un individuo adulto. Si se ingiere causa dolor de estomago, hinchazón del abdomen, vómitos violentos, diarrea, escalofrío, vértigos, opacidad visual y finalmente la muerte.(38,45).

El jugo de la raíz lo usaban algunas tribus del Caribe para llevar a cabo suicidios colectivos por motivos religiosos.

No obstante, la toxicidad de la raíz se elimina por la acción del calor.(38,45)

Extracto de Yuca.

El extracto de yuca químicamente eleva el rompimiento de desechos biológicos y es biodegradable.

Como resultado de ésta adición, en plantas de tratamientos de desechos podría flocular lo indeseado a la superficie con la espuma y ser fácilmente removido por desnatado.(43).

En el área de uso de los alimentos, un segmento de aplicación ya aprobado por la F.D.A. es su uso en bebidas y productos no lácteos.

El extracto de la planta puede ser utilizado efectivamente como un agente natural de espumado o de batido en bebidas suaves carbonatadas, mezclas de cócteles, bebidas especialmente batidas, mezclas de leche malteada y productos no lácteos.

Como ingrediente es particularmente adecuado para aplicaciones donde una apariencia frotante y una espuma estable son altamente deseables por ejemplo en cerveza de raíz, usando niveles de 50 a 150 ppm produce una espuma altamente estable. (43)

C) Presentación en el mercado :

El extracto está disponible en el mercado en 3 formas (43) :

1) Una forma líquida concentrada que se extrae con presión y frío para asegurar la retención de todos sus atributos en estado natural. El extracto en forma líquida está disponible en un intervalo de 10 a 50 ° Brix y tiene un intervalo de pH de 3.8 - 4. Es soluble en sistemas líquidos y no lo afecta el tratamiento térmico o pH.

2) Una forma del extracto secada por congelación en un grado denominado *premio* es aproximadamente 99.6 % soluble en agua y tiene un pH promedio de 4.1 .

3) Otro grado secado por congelación denominado *regular* es aproximadamente 90 % soluble en agua y tiene un pH promedio de 4.3 .

Las tres formas tienen un color café oscuro y un sabor ligeramente amargo. Sin embargo, en los niveles recomendados de adición, el color y sabor no se imparten al producto final.

CAPITULO II
METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 EL DESARROLLO METODOLOGICO.

2.1.1. Descripción del Desarrollo Metodológico.

Nuestra investigación experimental, se aplicó a la deshidratación de extracto de yuca, apoyándonos en los conocimientos teóricos de la operación del secado por aspersión, se trató de dar solución al problema presentado, el cuál resultó muy interesante y amplio.

El problema presentado consistió en evaluar las condiciones adecuadas para la aplicación del secado por aspersión a nivel planta piloto de un extracto de yuca líquido a diferentes contenidos de sólidos solubles (14.5° y 36° Brix). Para ello se definieron los criterios de operación a considerar durante la planeación del diseño de experimentos*.

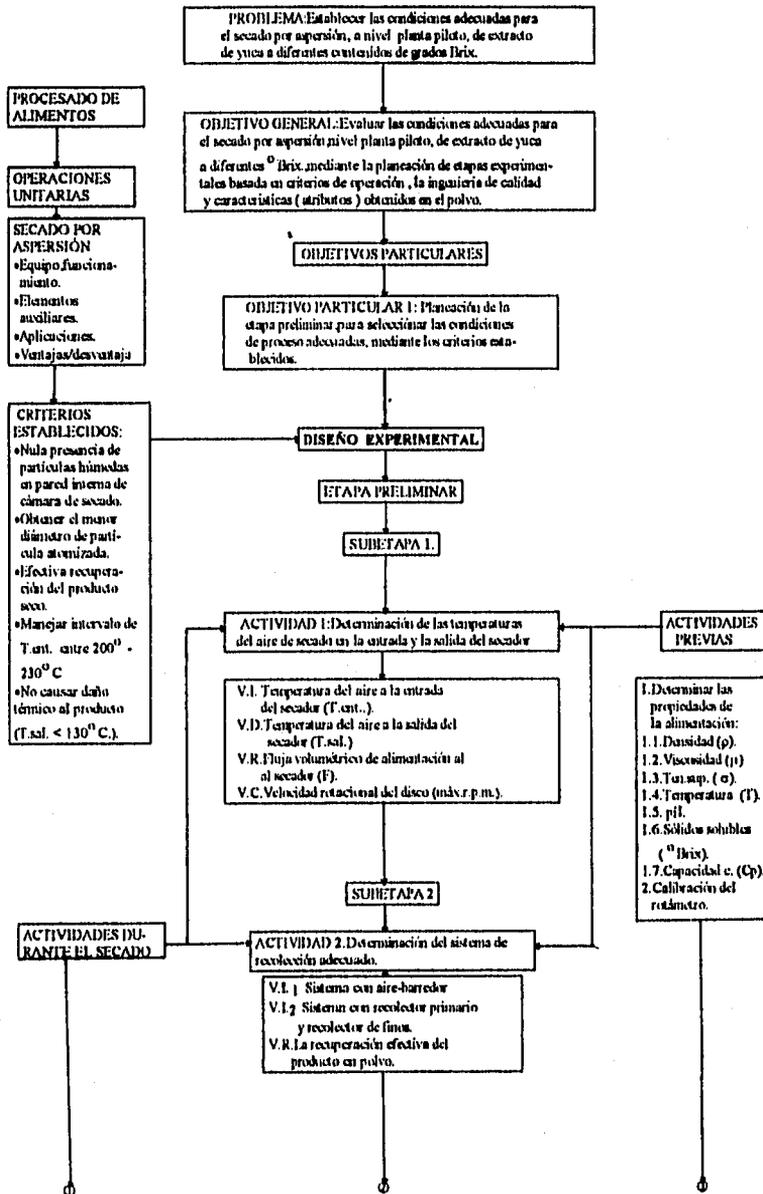
El diseño de experimentos constó de tres etapas principales: La primer etapa es la preliminar* donde se realizaron experimentos, que mediante resultados de acierto-error; condujeron a un mejoramiento apreciable en la aplicación. La estructura que soporta estos experimentos y sus resultados, está conformada por tres subetapas, en las que su objetivo era reducir y dislumbrar una a una las posibles variaciones en los factores importantes de la investigación. La segunda etapa es la definitoria* de la cuál se extraen los resultados que sirven para la etapa subsecuente. La última, que es la etapa de optimización* de las variables que influyen en las condiciones de operación. Estas dos etapas están basadas en los marcos teóricos y prácticos de la ingeniería de calidad*. Una de las herramientas principales de la planeación de experimentos en la etapa definitoria es la metodología Taguchi, que mediante los arreglos ortogonales redujo considerablemente el número de combinaciones posibles entre las variables de investigación a evaluar.

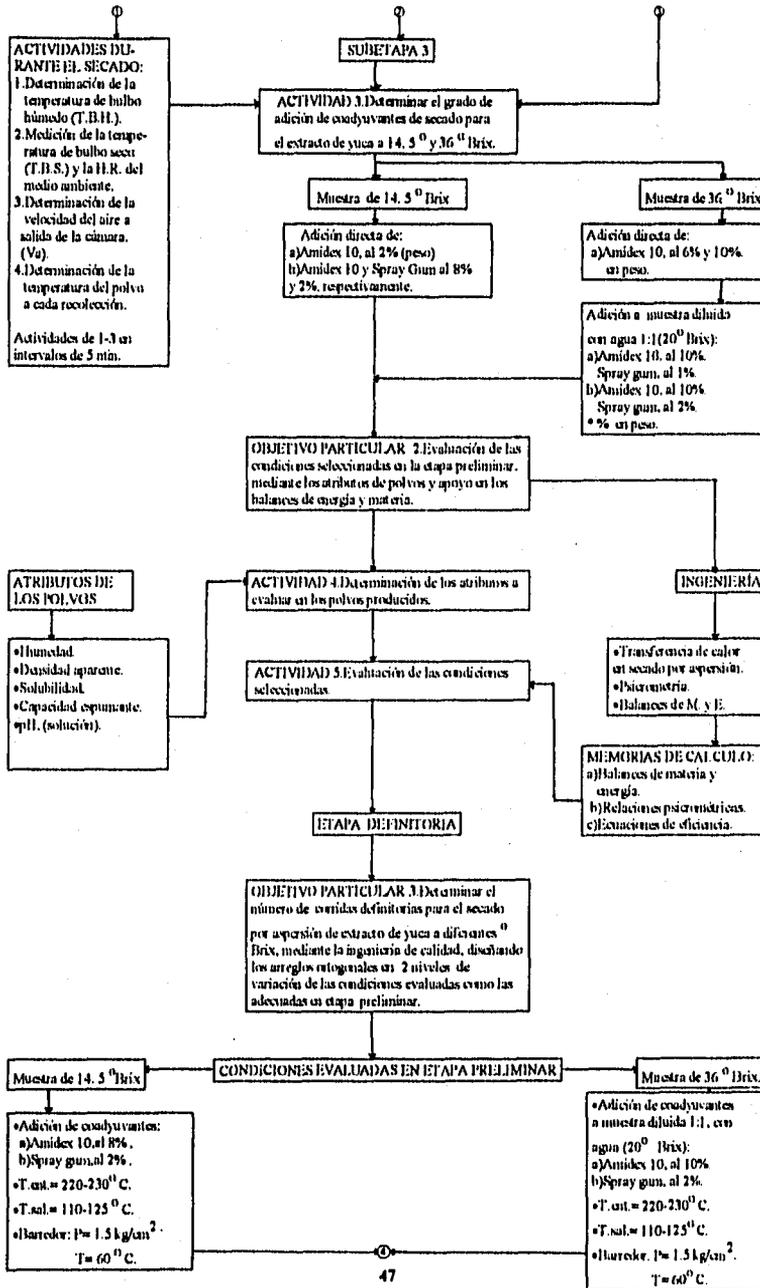
Como se puede apreciar en el cuadro metodológico se plantearon actividades para cada objetivo particular; estas actividades son las realizadas previas, durante y posteriores al secado. La información recabada en la realización de estas actividades nos permite evaluar el funcionamiento de la aplicación. Sin embargo, la toma de decisiones se complementó comparando los resultados obtenidos de los balances de materia y energía. (Ver anexos).

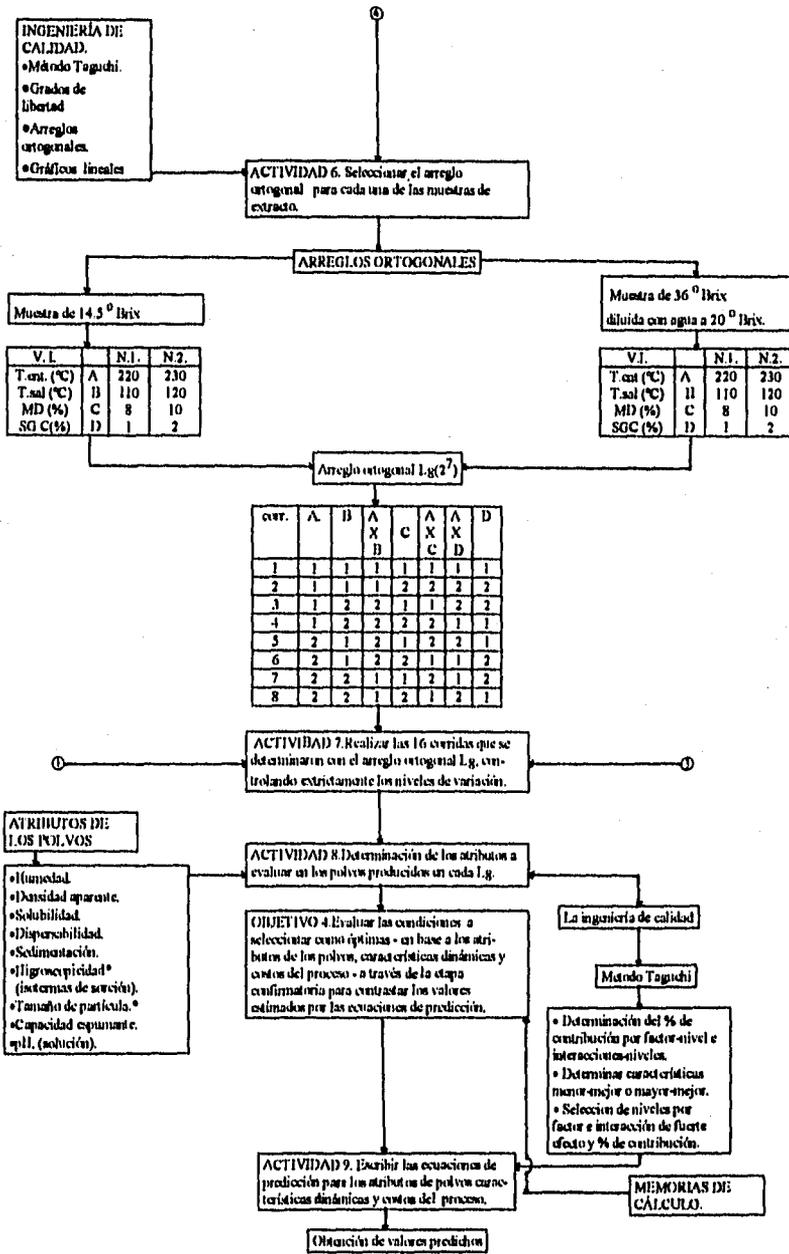
La parte final de la etapa de optimización, nos permite contrastar los resultados predichos por las ecuaciones extraídas del análisis de los arreglos ortogonales, y de esta forma poder concluir consistentemente con la seguridad de una reproducción aceptable de los resultados.

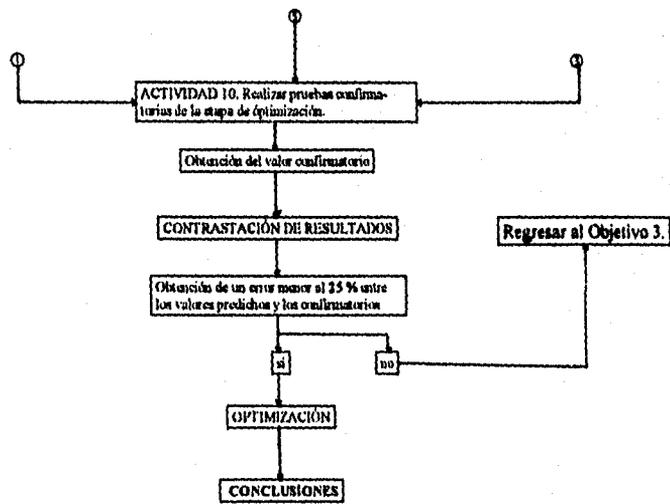
* Ver Cuadro metodológico.

DIAGRAMA DEL DESARROLLO METODOLOGICO









2.1.2. El diseño experimental.

De acuerdo con el cuadro metodológico anteriormente descrito, se explica el diseño de experimentos involucrados en la investigación.

En la estrategia experimental seguida, se intenta dar solución al problema de secar el extracto de yuca con 14.5° y 36° Brix, por lo cuál se eliminó la variación de los factores que tienen poco efecto sobre la función objetivo planteada inicialmente, mediante una etapa de experimentos preliminares.

En la etapa preliminar se realizaron las tres subetapas siguientes:

Subetapa 1.- Establecida principalmente para evaluar el intervalo de temperatura del aire de secado a la entrada, recomendado para la deshidratación de extractos naturales(26,54) el cuál es de 200° a 230° C. Conjuntamente se evaluaron las temperaturas del aire de salida, el flujo volumétrico alimentado y se decidió emplear la máxima velocidad rotacional del disco, con la finalidad de obtener el menor diámetro de partícula.

Subetapa 2.- Derivada de los resultados obtenidos en la subetapa 1, se evaluaron los sistemas para la recolección del producto deshidratado, con los que dispone el secador utilizado. Estos son el sistema de recolección en dos puntos (recolector primario y de finos) y el sistema de recolección total en un punto (sistema aire-barredor). Para seleccionar aquel que permitiera una recuperación efectiva del producto en polvo.

Subetapa 3.- Se estableció a partir de los resultados de las subetapas anteriores. Tuvo como finalidad la evaluación de los porcentajes de adición de coadyuvantes de secado, que permitieran contrarrestar la naturaleza higroscópica del producto. Los niveles de los porcentajes de adición evaluados fueron establecidos de acuerdo con asesorías técnicas (3,15 y 25) y observaciones al experimentar.

Por otro lado, al realizar la etapa preliminar, se efectuaron actividades experimentales antes, durante y después de cada corrida de secado. Dentro de las actividades previas a la deshidratación (Ver cuadro 11, pagina 57) se cuenta la calibración del rotámetro, la cuál se realizó por que es necesario conocer el flujo volumétrico y másico alimentado al secador. esta calibración se realiza midiendo diferentes volúmenes obtenidos por unidad de tiempo, manteniendo constante un valor de flujo en el rotámetro. Otras determinaciones experimentales previas son la densidad, tensión superficial y viscosidad; las cuales se consideran propiedades fundamentales para lograr una formación de gota en la atomización de la alimentación (21, 33 y 34).

La evaluación de características de calidad en los polvos obtenidos de la etapa preliminar nos han conducido a una etapa definitoria, donde la evaluación de las variables significantes del proceso y su optimización son el objetivo principal. Esta etapa incluye la planeación ordenada de experimentos por medio de la ingeniería de calidad.

El propósito de esta fase es obtener experimentos exitosos con resultados reproducibles, basándonos en la metodología Taguchi (18.19) y se aplicaron los siguientes pasos:

- 1.- Planeación de experimentos.
- 2.- Diseño de experimentos.
- 3.- Conducción de experimentos.
- 4.- Análisis de resultados experimentales.

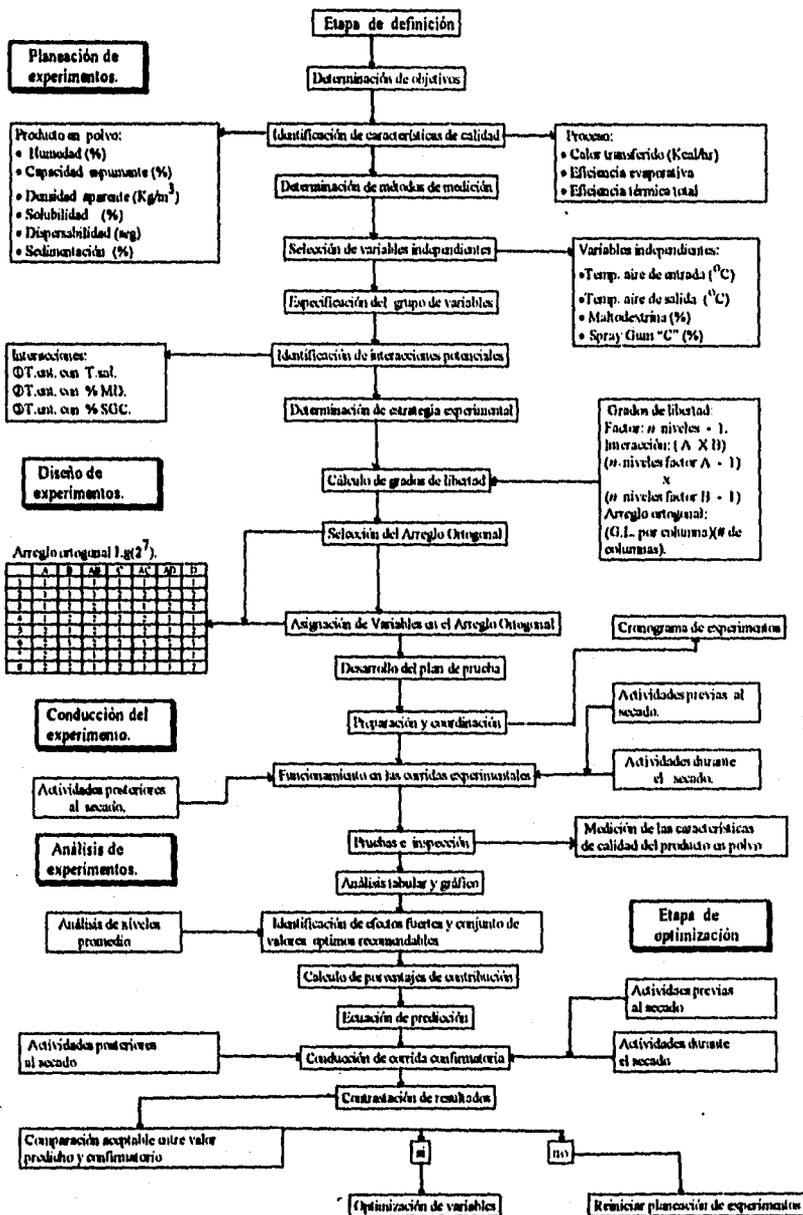
Estas cuatro fases quedan mejor explicadas en el siguiente diagrama, que representa la estructura seguida una vez que se superó la etapa de experimentos preliminares y se identificaron las condiciones adecuadas para el secado por aspersión del extracto de yuca.

En la planeación de experimentos los objetivos determinados fueron básicamente:

(1) Evaluación de los efectos sobre los atributos de calidad, generados por las variables de interés a los niveles seleccionados, a través de los resultados promedio obtenidos de los arreglos ortogonales para definir los niveles recomendables en el secado por aspersión de las muestras de extracto.

(2) Evaluar los niveles óptimos para cada factor mediante el análisis de nivel promedio con la finalidad de mejorar la calidad del producto y reproducir tales resultados comparándolos con la ecuación de predicción para cada característica de calidad.

Diagrama del diseño de experimentos etapas de definición y optimización.



Los Atributos de Calidad identificados para el producto en polvo mensurables, son:

- Humedad en los polvos (%)
- Capacidad espumante (%)
- Densidad aparente (Kg/m^3)
- Solubilidad (%)
- Dispersabilidad (seg)
- Sedimentación (%)

Para contrastar, la determinación de balances energético y másicos, se registran como características dinámicas del proceso de secado las siguientes:

- Calor transferido (Kcal/hr)
- Eficiencia evaporativa (%).
- Eficiencia térmica total (%).

Los métodos de medición para estas características están especificadas en el Cuadro 5:

Cuadro 5. Métodos para determinar las características de calidad y dinámicas.

Característica de calidad	Método de medición *
Contenido de humedad	Termobalanza (aislada)
Capacidad espumante	Diferencia de volúmenes (%)
Solubilidad	Diferencia de masa no soluble
Dispersabilidad	Tiempo de dispersión.
Sedimentación	Diferencia de volumen sedimentado
Densidad aparente	Volumen ocupado por masa sólida
Calor transferido	Secuencia de cálculo
Eficiencia térmica total	Secuencia de cálculo
Eficiencia evaporativa	Secuencia de cálculo

* Los métodos para cada característica de calidad del polvo se describen en métodos y recursos para el producto deshidratado. En la parte de anexos (Memorias de cálculo) se encuentran las ecuaciones para las características dinámicas del proceso.

Las variables seleccionadas como independientes (ver Cuadro 6), están determinadas desde el análisis de los resultados obtenidos en la etapa experimental preliminar. Se indican las variables independientes consideradas en el estudio, así como los niveles de variación que se controlarían.

Cuadro 6. Variables independientes seleccionadas y niveles.

Lista de variables de interés	Niveles de variación	
	①	②
① Temperatura del aire de secado a la Entrada	220 °C	230 °C
② Temperatura del aire de secado a la Salida	110 °C	120 °C
③ Adición de Maltodextrina (AMIDEX 10)	8 %	10 %
④ Adición de Goma Arábiga Modificada (Spray Gum Tipo "C")	1 %	2 %

Estas variables se consideraron factores con influencia determinante sobre el adecuado secado por aspersión de las muestras de extracto de yuca, como se puede ver todos son factores continuos y se seleccionan solo dos niveles a manejar en estos, debido a que no deseábamos alargar el experimento y decidimos que no se necesitaban más para lograr el secado. Se definió desde los objetivos de esta etapa evaluar los niveles que resulten óptimos para mejorar el secado. Además de no alejarnos del intervalo especificado como recomendable (3,15,25) para su secado (200-235°C, en la temperatura de entrada del aire), y de controlar adecuadamente el flujo de alimentación para indirectamente variar y controlar la temperatura de salida (no mayor de 125°C); Con los intervalos de adición de los coadyuvantes de secado, se intenta reducir aquellos valores probados en la etapa preliminar, con la finalidad de disminuir el costo de esta preparación previa y evaluar su efecto sobre las características de calidad del producto en polvo.

La conveniencia de evaluar sólo dos niveles para cada factor de interés, se basa también en la reducción de experimentos del arreglo ortogonal a elegir, y en facilitar el análisis de resultados obtenidos dando la información requerida de manera explícita.

Una vez que se determinaron las variables o factores de importancia y el número de niveles, se identificaron las interacciones de interés consideradas como potenciales (Ver cuadro 7).

Cuadro 7, Interacciones de interés.

Interacciones potenciales de interés.
Temp.ent. - Temp.sal.
Temp.ent. - % Maltodextrina
Temp.ent. - % SprayGum "C"

Donde Temp. ent. es la temperatura de entrada del aire y Temp.sal. es la temperatura del aire de salida; % maltodextrina es el grado de adición de maltodextrina y % spray gum "C" es la adición de goma en porcentaje (peso/volumen).

El identificar la interacción implica que los factores relacionados, cuando actúan juntos tienen un efecto diferente sobre la característica de calidad al efecto producido de forma individual por cada factor.

La importancia de las interacciones anteriores radica en la ventaja de tomar su efecto a favor cuando se pueden hacer consideraciones importantes al optimizar el proceso.(19).

Previamente a la selección del arreglo ortogonal se realizaron los cálculos de grados de libertad, los cuales corresponden al número de comparaciones que se requieren hacer para evaluar el efecto entre los niveles de los factores y entre los mismos. Siendo igual para todas las variables independientes un número de dos niveles, las comparaciones a realizar para su análisis fue solamente una.

Es decir.

$$\text{Grados de Libertad por factor} = 2 \text{ niveles} - 1 = 1$$

Los factores (4) y las interacciones identificadas (3), pueden considerarse muy bien dentro de un arreglo ortogonal $L_8(2^7)$, el cual pertenece a la serie de arreglos ortogonales de 2 niveles, permite hasta siete columnas para factores e interacciones y requiere de solamente 8 experimentos para proporcionar la información requerida. La asignación de las columnas para los factores e interacciones se realizó mediante los gráficos lineales estándares y comparándolo con el realizado por nosotros inicialmente.

El arreglo ortogonal para la muestra líquida de extracto de yuca con 14.5° Brix, es el mismo para la muestra líquida de 36° Brix, sólo que esta última primero se diluye con agua destilada (Relación volumétrica de 1:1), disminuyendo su concentración a 20° Brix.

Cuadro 8. Identificación de factores y niveles.

Factor	Variable Independiente	Nivel	
		⊖	⊕
A	Temperatura de entrada del aire (Tent.).	220 °C	230 °C
B	Temperatura de salida del aire (Tsal.).	110 °C	120 °C
C	Adición de maltodextrina (% M.D.)	8 %	10 %
D	Adición de spray gum "c" (% SGC)	1 %	2 %

Cuadro 9. Arreglo ortogonal $L_8(2^7)$. Extracto de yuca (14.5° y 36° Brix).

Corrida	A	B	AXB	C	AXC	AXD	D
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	2	1
6	2	1	2	2	1	1	2
7	2	2	1	1	2	1	2
8	2	2	1	2	1	2	1

Una vez establecido el arreglo ortogonal a emplear (Ver cuadro 9) y designar las columnas del mismo con base en el gráfico lineal conveniente, se organizó un cronograma de experimentos (Ver cuadro 10) basándonos principalmente en la adición de los coadyuvantes de secado (% de M.D. y % de S.G.), y en la duración aproximada para cada corrida de secado; quedando así:

Cuadro 10. Cronograma de experimentos del arreglo ortogonal.

Serión	Factores y Niveles				Corrida
	T.E.A.	T.S.A.	% M.D.	% S.G.	
1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	7
2	1	1	2	2	2
	2	2	2	2	8
3	1	2	1	2	3
	2	1	1	2	9
4	1	2	2	1	4
	2	1	2	1	6

Para la planeación de conducción de experimentos se definieron tres etapas de actividades: La etapa de actividades previas al secado, la de actividades durante y la de actividades posteriores. Estas etapas están descritas en el cuadro 11.

En la etapa preliminar se había ya identificado que la muestra de 36° Brix necesitaba una dilución 1: 1 con agua destilada para reducir sus sólidos solubles a 20° Brix (Ver cuadro metodológico). Una vez con ésta concentración, al igual que la muestra de 14.5° Brix, se le adicionó primero la maltodextrina de forma lenta con agitación a velocidad constante proporcionada por un agitador de propelas. En seguida se adicionó la goma spray gum tipo "c" bajo condiciones idénticas de incorporación. La hidratación de la goma para dar el resultado deseado en el proceso de secado, requería de un tiempo mínimo de 12 hrs. por lo que para cada sesión en días hábiles de la semana, se preparaban las muestras un día antes, otorgando un tiempo promedio de 24 horas, para la completa hidratación de la goma.

Una vez listas las muestras se tomaban alícuotas para las determinaciones experimentales de viscosidad, tensión superficial, densidad aparente, contenido de humedad, capacidad espumante, contenido de sólidos solubles (° Brix), y pH. Su temperatura se determinó por medición directa con el termómetro, registrándose al inicio y en cada intervalo de 5 minutos durante el secado. La técnica del método empleado para cada una de las anteriores determinaciones se mencionan en métodos y recursos para la alimentación líquida, de este capítulo.

Cuadro II. Actividades realizadas en cada experimento del arreglo ortogonal.

Previas al Secado	Durante el Secado	Posteriores al Secado
Muestras Líquidas a alimentar: <ul style="list-style-type: none"> •Medición del volumen a secar. •Medición de ° Brix. •Medición de la temperatura. •Realizar dilución (a 36° Brix) •Adición de Coadyuvantes. •Determinación experimental de: <ul style="list-style-type: none"> - Densidad aparente. - Viscosidad. - Tensión Superficial. - Contenido de humedad. - Contenido de sólidos Totales. - Cont. sólidos solubles(° Brix). - pH - Capacidad Espumante. 	Muestras alimentadas: <ul style="list-style-type: none"> •Medición de la temperatura. •Control y registro del flujo de alimentación. Producto deshidratado: <ul style="list-style-type: none"> •Inspección de la circulación del producto dentro de la cámara de secado (registrar observaciones). •Recolección de producto en intervalos de tiempo especificados. •Medición de la temperatura a cada recolección. 	Muestras alimentadas: <ul style="list-style-type: none"> •Recolección del líquido restante recuperado. Producto deshidratado: <ul style="list-style-type: none"> •Registro del peso de producto obtenido por corrida. •Envasado del producto con etiqueta de identificación. •Determinación experimental de: <ul style="list-style-type: none"> - Contenido de humedad. - Solubilidad. - Dispersabilidad. - Sedimentación. - Capacidad espumante. - pH (rehidratado) - Densidad aparente. - Higroscopicidad (Isotermas). - Diámetro de partícula.
Al equipo (Secador por aspersión) <ul style="list-style-type: none"> •Inspección de instalación. •Limpieza general del equipo. •Instalación de partes desmontables. •Arranque del equipo en base al manual de operación. •Medición de condiciones ambientales (% H.R., temperatura) •Calibración del rotámetro con cada muestra líquida. •Establecimiento de condiciones del secado a realizar. 	Al equipo: <ul style="list-style-type: none"> •Control y registro de la T.ent. •Control y registro de la T.sal. •Control y registro de la presión y temperatura del aire-barredor. •Registro del tiempo en apagado-encendido de cada resistencia eléctrica del calentador de aire. Al proceso: <ul style="list-style-type: none"> •Registro del tiempo de inicio de cada corrida. 	Al equipo: <ul style="list-style-type: none"> •Apagado del equipo en base al manual de operación. •Desmontar las partes instaladas. •Lavado general del equipo. •Inspección final al término de la sesión. Al proceso: <ul style="list-style-type: none"> •Registro del tiempo de terminación por corrida.

La etapa de actividades durante el secado por aspersión, se dirigieron al control del proceso y obtención de la información experimental necesaria para posteriores aplicaciones en el tratamiento y análisis de resultados. En general es información útil para los balances de masa y calor, gastos energéticos (costos), y eficiencia del proceso.

Las actividades posteriores al secado por aspersión complementan la información requerida para el estudio. Cabe mencionar que se realizó un muestreo al azar de las muestras en polvo homogeneizadas para cada determinación experimental a evaluar al producto en polvo.

Las determinaciones al producto en polvo que en el Cuadro II están en letra cursiva (Higroscopicidad y diámetro de partícula) se evaluaron solamente a los polvos obtenidos después de la corrida de confirmatoria una vez alcanzada la optimización de las variables del secado por aspersión para cada muestra de

extracto de yuca. Esto se debe a la dificultad e incremento de costos que se generarían si la realización de las determinaciones fuera para cada corrida.

2.1.3. METODOS Y RECURSOS:

2.1.3.1. Descripción de métodos y recursos.

Métodos y recursos empleados para la materia prima.

Los métodos y recursos empleados para el extracto de yuca líquido de 14.5 ° y 36 ° Brix, se describen en el cuadro 12. El número de referencia se relaciona con la bibliografía para quien le interese la técnica o procedimiento seguido.

Cuadro 12. Métodos y recursos empleados para la materia prima

PROPIEDAD EVALUADA	METODO O RECURSO EMPLEADO	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
Contenido de humedad (%)	Humedad por estufa método gravimétrico	59
Contenido de sólidos solubles (° Brix)	Lectura directa de escala en refractómetro	59
pH	Papel indicador	41
Densidad (Kg/m ³)	Medición de peso a un volumen constante	22
Temperatura (°C)	Medición directa con termómetro	16
Tensión superficial (Dina/cm ²)	Medición de altura alcanzada en tubo capilar	41
Viscosidad (cp)	Medición de tiempo en viscosímetro de Ostwald	Manual de uso del viscosímetro
Capacidad calorífica (Kcal/Kg°C)	Cálculo mediante fórmula empírica	22
Entalpia	Cálculo mediante fórmula empírica	16, 22

Métodos y recursos empleados para el producto en polvo.

El cuadro 13, muestra los métodos y recursos empleados para determinar algunas propiedades del producto en polvo que se evaluaron en la investigación.

Cuadro 13. Métodos y recursos empleados para el producto en polvo.

PROPIEDAD EVALUADA	METODO O RECURSO EMPLEADO	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
Contenido de humedad (%)	Humedad por termobalanza	59, 61
Solubilidad (%)	Material no soluble retenido en papel filtro	61
Distribución de tamaño de partícula (micras)	a) Microscopio óptico b) Material retenido en mallas serie Taylor	a) 55, 57 b) 22, 33
Densidad (Kg/m ³)	Método y técnica de Abdel Kareem (1975)	22, 61
Dispersabilidad (seg)	Método de ADMI Bullerin (1971)	26, 61
Sedimentación (%)	Método de Tinay & Smail	26, 61
Capacidad espumante (%)	Medición del volumen obtenido de espuma	60
Higroscopicidad (Isotermas de sorción)	Métodos diferencial y gravimétrico	27, 44

2.1.3.2. Descripción de equipo e instrumentas utilizados.

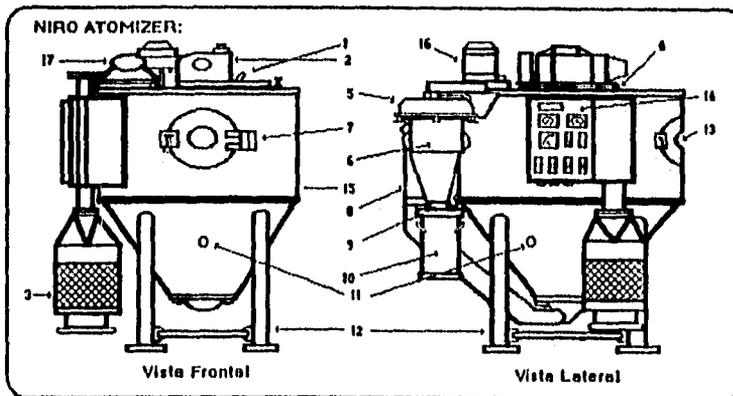
Equipo e Instrumentos dentro de la operación del secado

- **Secador por aspersión:** El secador por aspersión utilizado es una planta piloto de la cusa Niro Atomizer, tipo Production Minor, serie FU11BAA06, con atomización rotativa y de sistema contacto aire-asperjado en co-corriente. Sus dimensiones son 1.75 m de largo (considerando la sección cónica), 1.675 m de ancho, 3.10 m de alto y peso neto de 750 kg. Tiene 7.5 cm. de espesor de material aislante compuesto de fibra de vidrio y poliuretano expandido. El ventilador instalado en la parte superior de la cámara del secador tiene la función de hacer circular el aire de secado dentro de la misma, es de tipo centrifugo con impelentes curvados que al girar en dirección al sentido del reloj crea un efecto exhaustivo en la parte superior del ciclón. El ciclón que se ensambla debajo del ventilador, tiene 30 cm de diámetro al centro un ducto de separación del aire de salida.

El disco atomizador empleado tiene un radio de 6 cm y posee 24 orificios de una altura de 8 mm cada uno. Para la alimentación del fluido a secar se emplea una bomba de desplazamiento positivo (de tornillo) que lo transporta del recipiente de alimentación hasta la parte superior del secador, donde está instalado el sistema de atomización. Para controlar el flujo volumétrico alimentado se cuenta con un rotámetro instalado en la red de tubería, consiste en un tubo de vidrio templado con graduación de escala de 0- 100 % de flujo total, el 100 % de flujo corresponde a 167 l/hr de agua pura a una temperatura de 20° C. Un flotador cónico de níquel en el interior del tubo indica el flujo alimentado.

El sistema de calentamiento del aire para el secado consiste de una serie de resistencias eléctricas, de 1.5 Kw, 3.0 Kw, 9 Kw y 18 Kw, controlando la temperatura de entrada del aire. La figura 20 muestra al secador y partes que lo componen.

Figura 20. Secador por aspersión empleado.



Fuente: Niro Atomizer. Instruction Manual for N.A. Spray Drier Plant.

NOMENCLATURA:

- 1.- Distribuidor de la alimentación líquida.
- 2.- Sistema de atomización (Caja de engranes y poleas).
- 3.- Calentador de aire de resistencias eléctricas.
- 4.- Dispersor del aire (ubicado en el techo).
- 5.- Ventilador exhaustivo de aire.
- 6.- Sistema de separación aire-partículas (Ciclón).
- 7.- Compuerta de Inspección.
- 8.- Túnel conductor del aire de salida (desmontable).
- 9.- Válvula de paso tipo mariposa (sistema recolector).
- 10.- Recipiente de recolección de producto seco (secundario o total).
- 11.- Tacones de golpeo.
- 12.- Patas de soporte del secador.
- 13.- Mirilla de inspección continua.
- 14.- Panel general de control.
- 15.- Cámara de secado (cilíndrica y fondo cónico).
- 16.- Motor del ventilador exhaustivo.
- 17.- Motor del sistema de atomización.

Los demás instrumentos empleados durante la operación del secado por aspersión se mencionan en el cuadro 14.

Equipos e Instrumentos empleados en el laboratorio.

Los equipos e instrumentos utilizados en el laboratorio, para determinaciones experimentales tanto de la materia prima como para el producto en polvo se describen en el cuadro 15.

Cuadro 14. Instrumentos empleados en el secado.

Instrumento	Características	Función
Termómetros de mercurio	Escala de -10° a 150° C. (*1° C)	Medición de la temperatura bulbo húmedo (del aire de salida) y temperatura de muestra líquida
Termohigrómetro de cabello	Escala de T: -10 a 50 o C (*1° C) Escala de % H.R.: 0-100% (*2 %)	Medición de temperatura y % H.R. del aire atmosférico.
Rotámetro	Escala de flujo de 0-100 % 100% = 167 lt/hr (H ₂ O)	Control del flujo volumétrico alimentado al secador
Anemómetro mecánico	Escala de 0-100 ft/seg.	Medición de la velocidad del aire de salida

Cuadro 15. Equipos e instrumentos empleados en el laboratorio.

Equipo/Instrumento	Características	Función
Estufa de vacío	Temperatura de 50- 350 °C	Determinación de humedad en muestras líquidas, mantener material a peso constante
Termobalanza	Temperatura: 0-300° C	Determinación de humedad en muestras deshidratadas.
Balanza analítica	Capacidad de 1999,9grs sensibilidad de 0.0001 gr.	Medición de peso en métodos de humedades, solubilidad, densidad, e higroscopicidad.
Balanza granataria	Capacidad de 2610 grs. (*1 gr.)	Medición de peso en métodos de adición de coadyuvantes, polvo obtenido, capacidad espumante, solubilidad, etc.
Agitador magnético	Velocidad de agitación en escala de 1-8	Agitación con mosca magnética en métodos de solubilidad, cap. espumante, y dispersabilidad.
Agitador de propelas	motor de 1/3 HP. variación de velocidad con reostato.	Incorporación de coadyuvantes en las preparaciones previas
Refractómetro electrónico	Refractómetro de Abbe escala de 0-100 ° Brix	Medición de sólidos solubles en muestras líquidas.
Pienómetros	Vidrio, de 10-15 ml. tapa esmerilada	Medición de volumen en método de densidad, muestras líquidas.

Cuadro 15. Continuación.

Instrumento	Características	Función
Viscosímetro de Ostwald	Cole-Palmer Ins. Medidas 150 y 300	Determinación de Viscosidad en muestras líquidas .
Tubos capilares	Altura max. 50 mm. Diámetro: 0.005 m	Medición de altura alcanzada en método de tensión superficial.
Desecador de vidrio	Material de vidrio aislante y material desecante	mantener a peso constante material de vidrio y papel filtro.
Higrómetro capilar	AQUALAB, control externo de temperatura de 0-60 °C, tiempo de respuesta: 5 min., capacidad de 0-3 grs. de muestra	Determinación de la av en método de higroscopicidad de producto en polvo.
Baño termostático	HAKÉ, control de temperatura en intervalo de -5 a 100° C.	Mantener a temperatura constante el controlador de temperatura del higrómetro capilar en método de higroscopicidad de polvos.
Recipiente con sello hermético	Material de vidrio aislante	Mantener herméticamente cerrado el espacio interno de la cápsula para determinar higroscopicidad.
Recipiente y malla No.760	Material de acero inoxidable, con 760 orificios por cm ²	Mantener la muestra en polvo para la libre transferencia de humedad. Dentro de la cápsula aislada .
Microscopio óptico	Oculares de 10X, 40X y 100X, con aceite de inmersión	Determinación del Diámetro promedio de partícula en aceite de inmersión.
Mallas o tamices	Serie Taylor Nos. 80, 100 y 120	Determinación de distribución de tamaño de partícula en polvos.

CAPITULO III
ANALISIS DE RESULTADOS

3.1. Análisis de resultados de etapa preliminar.

El cuadro 16, muestra las propiedades de los fluidos problema evaluados en la etapa preliminar. Se puede observar que la relación del contenido de humedad con respecto al contenido de sólidos solubles varía de forma inversa; conforme se adicionan los coadyuvantes se incrementa el contenido en ° Brix y esto reduce considerablemente el contenido de humedad de las muestras líquidas.

La adición de los coadyuvantes de secado logra la disminución de la tensión superficial. Algunos materiales requieren la adición extra de agentes tensoactivos para reducir la tensión superficial con la finalidad de facilitar la dispersión de los polisacáridos y ayudar a su atomización; o en ocasiones la naturaleza química de los mismos no requiere de tales procesos previos (26, 33, 47). El extracto de yuca, no presenta valores elevados de tensión superficial y tiende a disminuirse con el contenido de sólidos en las muestras; la nula adición de tensoactivos a las muestras no afecta de manera observable la adecuada dispersión de los coadyuvantes adicionados, tampoco afecta la atomización.

Dentro del mismo análisis, la densidad y la viscosidad presentan un ligero aumento; esto es debido a la funcionalidad de la maltodextrina adicionada de aumentar contenidos de sólidos, y de estandarizar la viscosidad. Sin embargo, todos los fluidos (cuadro 16) se consideran bombeables.

Cuadro 16. Propiedades de los fluidos.

Corrida	Humedad (%)	Densidad (Kg/m ³)	Viscosidad (cp)	Ten.sup. (Dina/cm ²) x10 ⁻¹¹	Sólidos solubles °Brix	Temp. alimen. (°C)	PH
A	86.59	1,063	2.05	6.77	14.5	20	4.0
B	79.27	1,075	2.55	6.32	16.4	20	4.0-5.0
C	78.06	1,090	3.66	5.34	23	20-21	4.0-5.0
D	60.62	1,130	4.78	5.82	36	20-21	4.0-5.0
E	74.29	1,090	3.10	4.27	28.7	20-21	5.0-6.0
F	73.49	1,096	3.62	4.27	29	20-21	5.0-6.0

Los resultados analíticos presentados aquí son promedio de tres repeticiones.

A = Extracto de 14.5 ° Brix

B = Extracto de 14.5 ° Brix más 2 % de spray Gum

C = Extracto de 14.5 ° brix más adición de 2% spray Gum y 8 % Maltodextrina

D = Extracto de yuca con 36° Brix.

E = Extracto de yuca con 36° Brix, diluida hasta 20 ° Brix, más 1 % de spray gum y 10 % de maltodextrina

F = Extracto de yuca con 36° Brix, diluida hasta 20 ° Brix, más 2 % de spray gum y 10 % de maltodextrina.

La previa dilución del extracto con agua destilada en relación volumétrica de 1 : 1 para la muestra de 36° Brix, fué necesaria para evitar los problemas de bombeo que presentó al tratar de alimentar de forma directa hacia el sistema de secado.

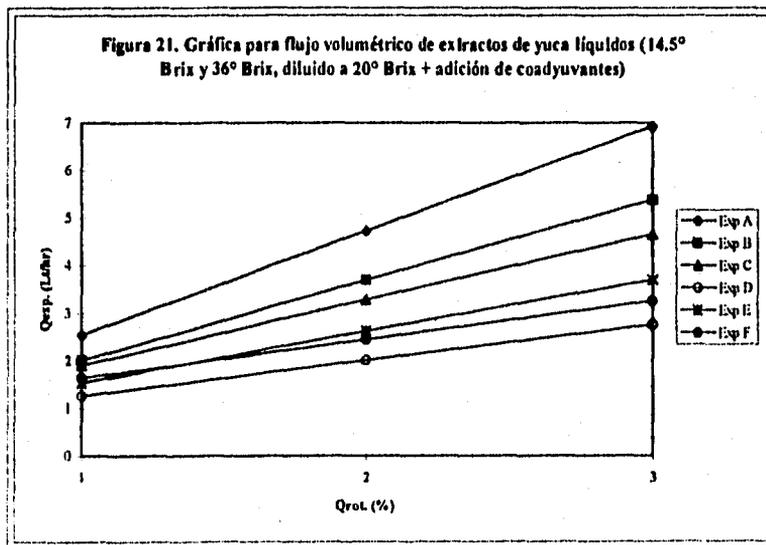
Se realizaron otras determinaciones de dilución para la muestra de 36° Brix. Sin embargo, el objetivo era reducir su contenido de sólidos hasta un valor de 20° Brix, y la relación anterior fué la que dió el resultado deseado. A partir de este contenido de sólidos solubles se evaluaron las corridas experimentales posteriores.

Como se ha especificado anteriormente, el sistema de alimentación cuenta con un rotámetro medidor del flujo volumétrico alimentado, como su diseño y construcción se evaluó para agua pura a temperatura ambiente; se requirió la calibración del mismo para determinar el flujo volumétrico real en cada corrida de secado. Las relaciones matemáticas obtenidas mediante análisis de mínimos cuadrados para relacionar el valor de flujo registrado por el rotámetro y el determinado de forma experimental, se muestran en el cuadro 17 y la figura 21. Los coeficientes de correlación obtenidos indican un adecuado ajuste de linealidad. Se observa que al aumentar el contenido de sólidos solubles en las muestras de extracto la pendiente de la relación entre gasto del rotámetro y gasto experimental disminuye, lo cual indica que a mayor contenido de sólidos menor flujo de líquido.

En los experimentos donde se emplearon los fluidos tal y como se tenían de los contenedores; es decir, sin la adición de coadyuvantes, no se obtuvo producto en polvo en forma considerable y se observó la marcada tendencia de las partículas atomizadas a adherirse a la superficie de las paredes internas de la cámara de secado, lo cual dirigió los posteriores experimentos a evaluar la adición de coadyuvantes tales como maltodextrinas (Amidex 10) (1) y gomas encapsulantes (Spray gum tipo "c") (11,15,25); los resultados obtenidos fueron satisfactorios para el secado eficiente de los extractos.

El problema de adherencia a las paredes internas de la cámara de secado se debió probablemente a la naturaleza de los sólidos solubles contenidos en la solución inicial; tal y como suele ocurrir en el caso de jugos de frutas y productos de tomate, los cuales contienen azúcares y otros sólidos (27,33). Estas sustancias solubles amorfas que conforman a las partículas secas y también a los aglomerados termo-plásticos, tienden a pegarse a las superficies cuando el polvo se acerca a su "punto de adhesión".

Este "punto de adhesión", está estrechamente relacionado con la higroscopicidad (27,44), la cuál se incrementa rápidamente si de igual forma se reduce el contenido de humedad en los productos de tal naturaleza. Este efecto comunmente reconocido por otros investigadores (26), se consiguió reducir mediante la microencapsulación de las gotas asperjadas con los vehículos auxiliares de secado. (3,11,15,25).



Cuadro 17. Ecuaciones para Flujo volumétrico.

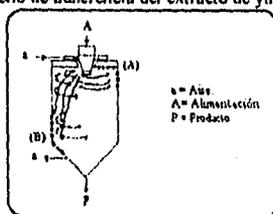
Experimento	Ecuación de regresión	Coefficiente (r^2)
A	$Q_{exp} = 2.008Q_{rot} + 0.325$	0.9999
B	$Q_{exp} = 1.578Q_{rot} + 0.319$	0.9989
C	$Q_{exp} = 1.2875Q_{rot} + 0.443$	0.9998
D	$Q_{exp} = 0.6432Q_{rot} + 0.50$	0.9996
E	$Q_{exp} = 0.9978Q_{rot} + 0.354$	0.9986
F	$Q_{exp} = 0.7866Q_{rot} + 0.742$	0.9998

Los valores analíticos evaluados por regresión son promedio de tres eventos.

De acuerdo con la teoría (33), el control sobre la tendencia de las partículas a adherirse a las paredes de la cámara del secador, por algunos productos alimenticios; puede realizarse por dos vías: 1) Controlando el efecto de rotación en el dispersor de aire, y 2) al emplear boquillas, la posibilidad de reubicarlas ofrece una ventaja para la operación sin la presencia de depósitos en las paredes, por un producto parcialmente seco.

En la siguiente figura (figura 22) se muestran las áreas más comúnmente impregnadas, por el ajuste del dispersor de aire en secadores grandes con atomización rotatoria. (A) El área de adherencia sobre el techo y la parte más alta de la pared se debe a la excesiva rotación del aire y la insuficiente depresión de la nube asperjada. (B) El área marcada sobre la parte inferior de la pared y el cono se debe a la excesiva depresión del asperjado y la insuficiente circulación de aire.(33).

Figura 22. Fenómeno de adherencia del extracto de yuca en polvo.



Este mismo fenómeno de adherencia fue factor importante para la selección del sistema recolector (Subtapa 2), eligiéndose trabajar con el barredor, ya que éste generó una circulación rotatoria forzada en las partículas para evitar su depósito en las paredes. Las condiciones de operación para el barredor, mantenidas durante cada experimento, fueron: $P = 1.5 \text{ Kg/cm}^2$ y $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

La recolección de las muestras A y D, las cuales no tienen adición de coadyuvantes de secado, fué difícil por la rápida adsorción de humedad del medio ambiente. La microcápsula generada por la adición de la goma y la maltodextrina, provee de una pared protectora a las partículas (46,58) que permite la rápida evacuación del agua ocluida y una captación nula de humedad del medio exterior, permitiendo la recuperación adecuada de los polvos de extracto de yuca.

De la subtapa 3, se obtuvo que para el extracto de 14.5 °Brix, las condiciones de adición de los vehiculos auxiliares de secado, fueron: 2 % de spray gum y 8 % de maltodextrina (ambos porcentajes en peso); y para el extracto de 20 °Brix, fueron: 1 % de spray gum y 10 % de maltodextrina (porcentajes en peso), correspondientes a los experimentos C y E

La velocidad de rotación que se mantuvo en el disco atomizador fué la de 24 000 r.p.m., la cuál en los diferentes experimentos generó los diámetros volumétricos medios de gota (D.V.M.), reportados en el cuadro 18. Como se observa el intervalo obtenido: 305 - 409 micras, coincide con otros reportados comunmente en la bibliografía (22,33).

Los diámetros de gota obtenidos en la muestra de 14.5° Brix (A, B, y C) son mayores debido a que se va aumentando el flujo volumétrico, es por la encapsulación de las partículas y la capacidad evaporativa del equipo que se permite el aumento del flujo volumétrico; por lo tanto, al tener la atomización a velocidad rotacional constante las gotas obtenidas en el cálculo fueron de mayor diámetro. Los experimentos D, E y F que corresponden a la muestra de 36° Brix diluida. También, tienen menor diámetro por sus bajos flujos de alimentación, el diámetro volumétrico medio de gota más bajo (305 micras) es de la muestra con 36° Brix y tiene un menor flujo volumétrico durante su secado ($0.54 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$) (Ver cuadro 18). En general se puede observar la tendencia del incremento proporcional del diámetro de la gota con el aumento del flujo volumétrico al mantenerse constante la velocidad rotacional del disco atomizador.

Las condiciones de secado están resumidas en el cuadro 18. Y en general las temperaturas de entrada en el aire de secado están en un intervalo de 225-230 °C, siendo las de salida en un intervalo de 120-125 °C.

Cuadro 18. Condiciones de secado, corridas de etapa preliminar.

CONDICIONES AMBIENTE *			CONDICIONES DEL SECADO *						
Corrida	Temp. amb. (°C)	Humedad relativa. (%)	Temp. de entrada (°C)	Temp. de salida (°C)	Temp. de bulbo h. (salida) (°C)	Flujo Volum. (m ³ /hr) $\times 10^{-3}$	Diámetro volum. medio (micras)	Velocidad del aire (m/s)	Duración por corrida (min)
A1	20	53	200	100	48	1.48	384.071	19.90	34
A2	20	53	210	110	32.7	1.48	384.071	19.70	40
A3	20	42	225-230	120-125	29.6	1.48	384.071	22.06	35
B	22	70	225-230	120-125	26	1.91	409.418	14.60	45
C	26	60	225-230	120-125	28	2.39	429.064	17.53	55
D	24	52	225-230	120-125	30.3	0.54	308.982	19.74	21
E	28	40	225-230	120-125	33	1.38	379.959	19.61	30
F	26	52	225-230	120-125	32.5	1.66	397.699	17.99	29

* los Valores Analíticos presentados aquí son promedio de las determinaciones en cada intervalo de tiempo.

A1 = A2 = A3 = Extracto de 14.5° Brix

B = Extracto de 14.5° Brix más 2% de spray Gum

C = Extracto de 14.5° Brix más adición de 2% spray Gum y 8% Maltodextrina

D = Extracto de yuca con 36° Brix.

E = Extracto de yuca con 36° Brix, diluida hasta 20° Brix, más 1% de spray gum y 10% de maltodextrina

F = Extracto de yuca con 36° Brix, diluida hasta 20° Brix, más 2% de spray gum y 10% de maltodextrina.

No obstante, las temperaturas de entrada están dentro de un rango elevado para otros alimentos secados por aspersión, pero el comportamiento de los polvos del extracto dentro de la cámara de secado, conforme se incrementaba la temperatura (200° hasta 230° C), mejoró (Observaciones registradas en subetapa 1). Por tal motivo se elige el valor entre un intervalo de 225-230 °C para la temperatura de entrada.

Aún cuando elegir estos valores puede ser causa considerable para crear los depósitos de producto dañado sobre la superficie interna de la cámara, la recuperación del producto se volvió más efectiva al pasar a la subetapa 3. (Ver cuadro 19).

Cuadro 19. Resultados de la etapa preliminar.

SUBETAPA	CORRIDA	RESULTADOS
1	A1, A2, A3 D	<ul style="list-style-type: none"> •Recuperación de más producto a mayor temperatura. •Producto recuperado higroscópico. •Operar con intervalo de 225-230°C en la T.ent. y otro de 120-125°C en la T.sal. •Diluir muestra de 36° Brix a 20° Brix. (Relación 1:1).
2	A y D	<ul style="list-style-type: none"> •Recuperación adecuada del producto con sistema aire-barredor.
3	B, C, E y F	<ul style="list-style-type: none"> •Para muestra de 14.5° Brix, con 2 % de SGC, y 8 % de MD., hay mayor rendimiento de producto seco. •Para muestra de 36° Brix diluida, con 1 % de SGC y 10 % de MD., hay mayor rendimiento de producto seco.

La temperatura de salida es un factor importante que tiene efecto sobre las características finales del producto, sobre todo en características relacionadas con la rehidratación del polvo como: solubilidad y contenido de humedad. Aunque el contenido de humedad esta más influenciado por las propiedades del aire de secado, tiempo de residencia y por la naturaleza de las partículas solubles de la alimentación. (29,33, 44).

La temperatura de salida se controló de forma indirecta con el flujo volumétrico de alimentación siendo éste de 1.3 lt/hr para la corrida E, y de 2.3 lt/hr para la C. Este flujo es muy pequeño comparado con otros fluidos secados por aspersion, esto se debe al alto contenido de humedad inicial y la tendencia de adhesión que impidió se aumentara más. También por ello se reportan tiempos de duración menores a la hora en cada corrida de secado (ver cuadro 18). Es necesario mantener la velocidad del aire en valores por arriba de 17 m/s, ya que permite el flujo de partículas secas y el tiempo de residencia al parecer adecuado sin causar daño térmico al producto seco.

Los resultados de los balances de materia y energía están dados en la cuadro 20 y de acuerdo con los productos de mejores resultados (corridas C y E), les corresponde una evaporación promedio de 0.04 Kg. de agua/Kg. de aire seco suministrado, es lógico esperar mayor producción y calor transmitido para el secado al tenerse humedades relativas del aire menores y flujo de alimentación del producto constante.

Cuadro 20. Resultados de los balances de materia y energía.

Exp	Cp(L) [Kcal/Kg°C]	Cp(s) [Kcal/Kg°C]	Mss (Kg.s.s./hr)	H.A.E. (Kg/Kg)	H.A.S. (Kg/Kg)	V.H. (m ³ /hr)	Ga (Kg.a.s./hr)	Q (Kcal/hr)	η_{evap} (%)	η_{Tot} (%)
A1	0.9062	0.0402	0.2101	0.0400	0.0850	0.1188	1332.7	67,566	65.78	58.14
A2	0.9062	0.0402	0.2101	0.0327	0.0717	0.1184	1323.8	72,040	60.97	52.91
A3	0.9062	0.0402	0.2101	0.0347	0.0755	0.1185	1481.1	77,488	55.38	47.73
B	0.8550	0.0620	0.4244	0.0446	0.0827	0.1190	976.11	55,735	55.86	48.08
C	0.8464	0.0658	0.5476	0.0475	0.0860	0.1192	1171.4	65,377	56.18	49.01
D	0.7243	0.1181	0.2419	0.0405	0.0784	0.1188	1321.9	73,003	55.55	47.62
E	0.8201	0.0760	0.3858	0.0397	0.0761	0.1187	1314.4	74,009	55.55	49.01
F	0.7430	0.0794	0.4829	0.0412	0.0971	0.1188	1204.8	67,187	55.55	48.78

Cp(L) = Capacidad calorífica del líquido.

Cp(s) = Capacidad calorífica del sólido.

Mss = Masa de sólidos seca alimentada.

H.A.E. = Humedad del aire a la entrada.

H.A.S. = Humedad del aire a la salida.

V.H. = Volumen húmedo del aire.

Ga = Gasto de aire seco.

Q = Calor transferido.

 η_{evap} = Eficiencia evaporativa. η_{Tot} = Eficiencia térmica total.

Se puede observar una relación directamente proporcional entre el valor de las capacidades caloríficas (Cp) tanto del líquido como del sólido al aumentarse el contenido de líquido o sólido respectivamente. También la relación entre el contenido de sólidos solubles y la masa de sólidos secos alimentados es directamente proporcional, excepto en la muestra de 36° Brix por ser muy bajo el flujo volumétrico de alimentación. Se observa un intervalo de humedades absolutas del aire a la entrada de 0.0327 a 0.0475 Kg agua/Kg aire seco., cabe mencionar que estos valores son específicos del lugar, día y hora donde se realizó cada corrida experimental; por otro lado, el intervalo correspondiente de humedades absolutas del aire a la salida (0.0717-0.0971) esta determinado por el intervalo de humedades absolutas del aire a la entrada, el flujo másico de alimentación y la capacidad evaporativa del equipo.

El intervalo reportado de los cálculos en gasto de aire seco esta influenciado por las condiciones ambientales y de secado para cada corrida experimental, que obviamente cambian de una a otra. En cuanto al calor transferido el valor mayor obtenido (77.48 Kcal/hr) corresponde al valor mayor de gasto de aire seco, ciertamente con los intervalos de temperatura de entrada seleccionados (225-230° C). La disminución de éste valor en las demás corridas marcadas como adecuadas, se puede deber a una reducción del gasto de aire seco suministrado y de las propiedades del mismo.

Las eficiencias evaporativa (55-65 %) y térmica total (47-58 %) están relacionadas con los valores de las temperaturas manejadas, estas son bajas. Sin embargo, se consideran aceptables de acuerdo con el rendimiento obtenido en aquellas corridas que resultaron adecuadas para el secado.

De los productos secos obtenidos que mostraron mejor rendimiento (85-90 %), se determinaron atributos de calidad, los cuales se mencionan en la cuadro 21.. Los contenidos de humedad aunque están por arriba del recomendado por la bibliografía (para polvos: 2% a 4.5 % de humedad) (33,44), se consideran aceptables, por ser los primeros obtenidos en la investigación, además por tener una capacidad espumante del 100 % , esta fue la propiedad más importante del extracto de yuca que se deseaba mantener después del secado; en cuanto a la solubilidad obtenida (93-95 %), es favorable ya que está dentro del intervalo de solubilidad (90-99 %) obtenido producto deshidratado por congelación de extracto de yuca (43). Los valores de densidad aparente están directamente relacionados con el contenido de humedad registrado en las muestras de polvo, al aumentar el contenido de humedad se incrementa la densidad aparente. El valor del pH al disolver la muestra deshidratada, no cambia del reportado bibliográficamente (43) y del valor reportado experimentalmente (ver cuadro 16, pag.63).

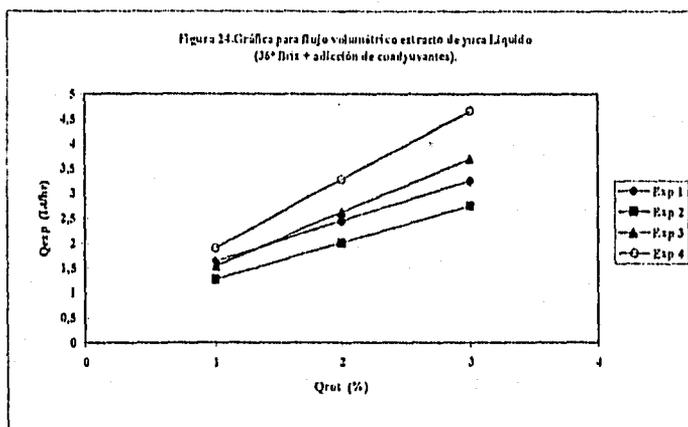
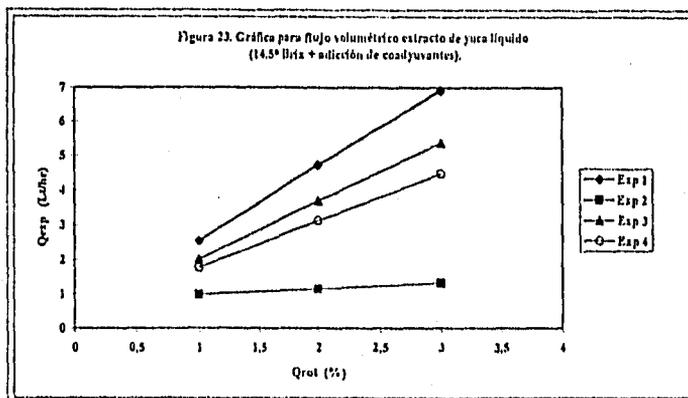
Cuadro 21. Atributos de calidad del polvo obtenido.

Exp.	Humedad (%)	Densidad Aparente (Kg/m ³)	Solubilidad (%)	Capacidad Espumante (%)	pH (en solución)
C	5.01	476	93.7	100	4.5
E	6.07	581	95.7	100	4.5

3.2. ANALISIS DE RESULTADOS DE ETAPA DEFINITORIA (METODO TAGUCHI)

En las figuras 23 y 24, así también en cuadros 22 y 23, se muestran los resultados de la calibración del rotámetro para mantener el control y registro del flujo másico alimentado en cada corrida diseñada en la etapa definitoria. De estas se observa que la pendiente se dismuye al aumentar el contenido de sólidos de los extractos.

Los resultados obtenidos al aplicar el método Taguchi, están representados mediante contribución porcentual de cada factor e interacción involucrados en el $L_8 (2^7)$ (Ver metodología, capítulo II, pag.55).



Las figuras 23 y 24 corresponden a las gráficas de corrección para los flujos volumétricos de las muestras líquidas de extracto de yuca con 14.5° y 36° Brix, respectivamente. Para los experimentos del arreglo ortogonal.

Cuadro 22. Ecuaciones para flujo volumétrico (extracto de 14.5° Brix).

Experimento	Ecuación de regresión	Coefficiente (r^2)
1	$Q_{exp}=2.19Q_{rot} + 0.35$	1.0
2	$Q_{exp} = 0.17Q_{rot} + 0.80$	0.9999
3	$Q_{exp} = 1.69Q_{rot} + 0.32$	1.0
4	$Q_{exp} = 1.36Q_{rot} + 0.40$	1.0

Cuadro 23. Ecuaciones para flujo volumétrico (extracto de 36° Brix, diluido).

Experimento	Ecuación de regresión	Coefficiente (r^2)
1	$Q_{exp} = 0.80Q_{rot} + 0.83$	1.0
2	$Q_{exp} = 0.74Q_{rot} + 0.52$	0.9999
3	$Q_{exp} = 1.08Q_{rot} + 0.46$	1.0
4	$Q_{exp} = 1.38Q_{rot} + 0.52$	1.0

CAPITULO III Porcentajes de Contribución por Factor-Nivel Óptimo e Interacciones Análisis de Resultados
 Extracto de 14.5º Brix

Figura 25

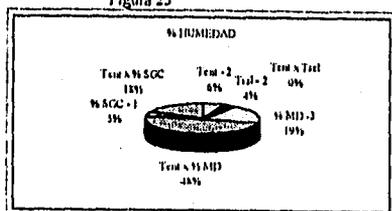


Figura 26

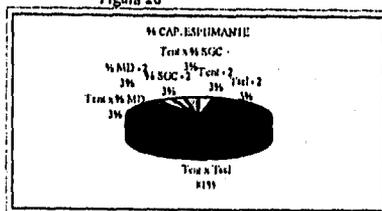


Figura 27

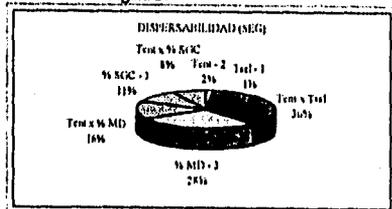


Figura 28



Figura 29

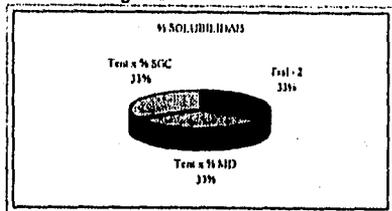
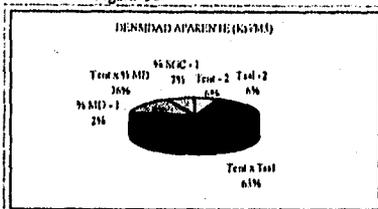


Figura 30



CAPITULO III Porcentajes de Contribución por Factor-Nivel Optimo e Interacciones Análisis de Resultados
 Extracto de 14.5° Brix

Figura 31

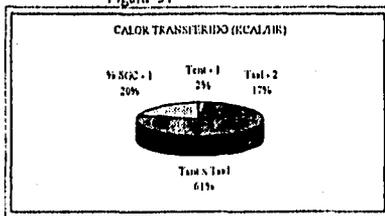


Figura 32

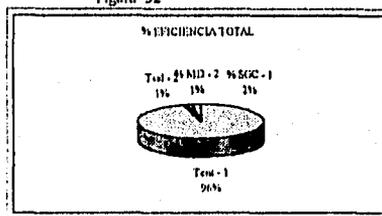


Figura 33

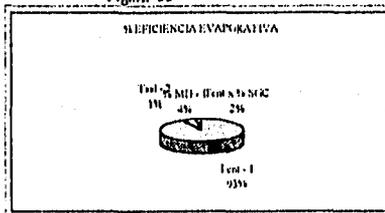
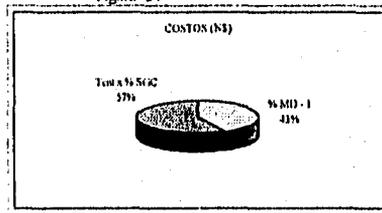


Figura 34



Los gráficos de las figuras No.25 al No.30 muestran que para el extracto de yuca en polvo obtenido a partir del líquido con 14.5 °Brix, las características: Contenido de humedad (%), sedimentación (%) y solubilidad (%), son fuertemente afectadas por la interacción entre la Temperatura de entrada del aire (T.ent.) y el % de maltodextrina adicionado (% MD.) (48 %, 60 %, y 33 % de contribución, respectivamente). No así, las características: Capacidad espumante (%), dispersabilidad (seg), y densidad aparente (Kg/m³), que en cuyo caso es la interacción T.ent. x T.sal. con 81 %, 35 % y 63 % de contribución, respectivamente.

Esto hace resaltar la importancia de las interacciones estudiadas. No obstante, que de forma individual, los factores como el % de SprayGum "C" (% SGC.) y % MD. reportaron contribución porcentual desde un 2 % hasta un 27 % en todas las características excepto en solubilidad (donde las interacciones con T.ent. son de mayor contribución). Lo cual refleja que la adición de estos coadyuvantes para facilitar el secado es indispensable para la obtención del producto.

Con respecto a los resultados obtenidos en las características dinámicas del proceso de secado, se presentan en los gráficos de las figuras No.31 al No.34, los porcentajes de contribución por factor-nivel óptimo e interacción para el procesamiento de la muestra de 14.5 ° Brix. En la evaluación del calor transferido (Kcal/hr) se tiene un mayor efecto por parte de la interacción T.ent. x T.sal. (61 % de contribución), cabe resaltar, que el % SGC tiene un porcentaje de 20 % de contribución, el cual puede deberse al microencapsulamiento (46.58) que facilite la transferencia.

En las eficiencias térmica total y evaporativa, la T.ent. es determinante (96 % y 93 % de Contribución, respectivamente).

En los gráficos de las figuras No.35 al No.40 se presentan las contribuciones porcentuales por factor-nivel óptimo e interacciones, indicando en el polvo obtenido del extracto líquido de 36 °Brix (diluido previamente) que las características: Capacidad espumante (%), sedimentación (%), y solubilidad (%) están fuertemente influenciadas por la interacción entre T.ent. y T.sal. (37 %, 59 %, y 57 %, respectivamente). Respecto a otras características: Contenido de humedad (%), y densidad aparente (Kg/m³), las mayores contribuciones corresponden a la interacción T.ent. x % SGC. (25 % y 32 %, respectivamente) y a la T.sal. (20 % y 43 %, respectivamente) y al % MD. (20 % y 12 %, respectivamente). La dispersabilidad (seg), es determinada principalmente por la interacción entre la T.ent. y el % MD.(48 % de contribución).

Por parte del análisis del calor transferido el gráfico de la figura No.41 muestra que los factores % SGC. y % MD. son factores fuertes (30 % y 28 %, respectivamente). En las eficiencias térmica total y Evaporativa (%), la T.ent es determinante (con 68 % y 82.5 de contribución, respectivamente).(ver gráficos de las figuras Nos. 42 y 43).

CAPITULO III Porcentajes de Contribución por Factor-Nivel Optimo e Interacciones Análisis de Resultados
 Extracto de 36° Brix

Figura 35

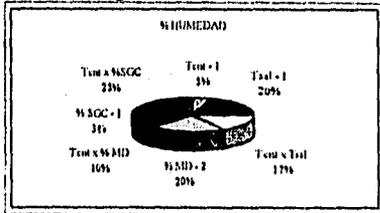


Figura 36

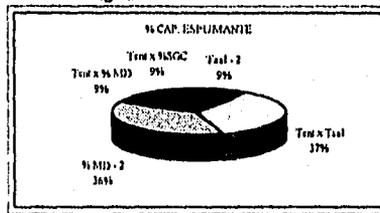


Figura 37

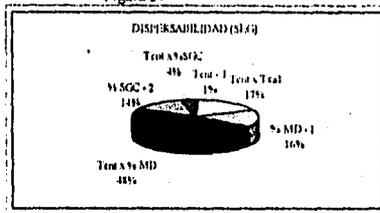


Figura 38

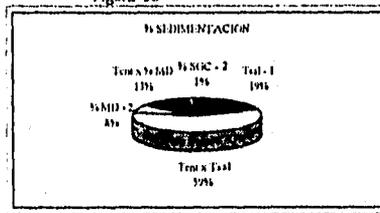


Figura 39

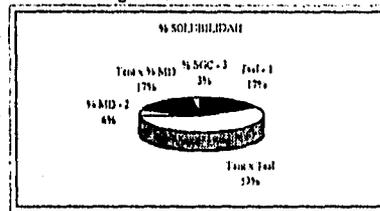
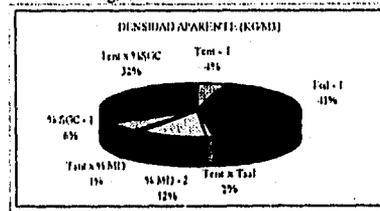


Figura 40



CAPITULO III Porcentajes de Contribución por Factor-Nivel Óptimo e Interacciones Análisis de Resultados
 Extracto de 36° Brix

Figura 41

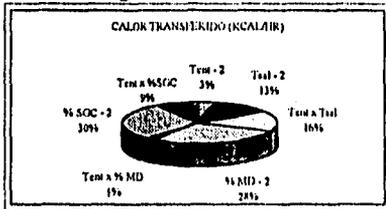


Figura 42

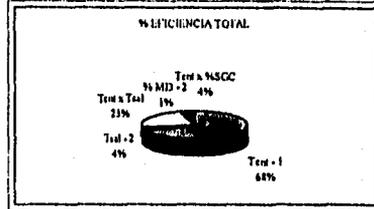
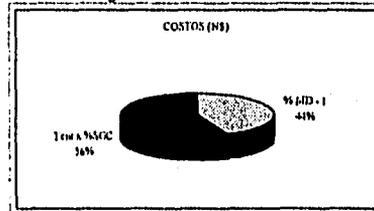


Figura 43



Figura 44



Estas variaciones en los factores-niveles óptimos e interacciones de influencia entre los productos obtenidos del líquido 14.5° y el de 36° Brix, se atribuyen al contenido de sólidos iniciales y a las propiedades físicas de cada extracto, que por consiguiente difieren.

Finalmente, en la evaluación de costos (\$/Kg) para las corridas realizadas, los resultados en % de contribución por factor e interacción se muestran en los gráficos de las figuras Nos.34 y 44. El factor de mayor efecto es % MD. (de 43 % a 44 % de contribución) y la interacción Tent x % SGC. (de 56 a 57 % de contribución). Obviamente, éstas tres variables se recomiendan al nivel 1, para tener el menor costo.

En el cuadro 24, se reportan los resultados obtenidos por el método Taguchi para las interacciones T.ent. x T.sal. (AXB), T.ent. x % MD. (AXC), y T.ent. x % SGC. (AXD), aquí se identifica el tipo de interacción (fuerte, media y débil) y los niveles óptimos para la combinación (indicados por subíndices 1 o 2). De esta forma, se puede complementar el análisis de las interacciones. (por ejemplo: la interacción AXC con 48 % de contribución en % Humedad, es una interacción de fuerte influencia y los niveles óptimos son T ent -2 y % MD - 1, es decir: 230 ° C y 8 % adición, respectivamente). De igual manera el cuadro 25, muestra la misma información correspondiente al extracto líquido de 36 ° Brix (diluido).

Cuadro 24. Interacciones del $L_8(2^7)$ para muestra de 14.5° Brix

CARACTERÍSTICA EVALUADA	INTERACCIONES			
	A x B	A x C	A x D	
HUMEDAD (%)	TIPO	MEDIA	FUERTE	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₂ C ₁	A ₁ D ₂
CAPACIDAD ESPUMANTE (%)	TIPO	FUERTE	MEDIA	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₂ B ₁	A ₂ C ₂	A ₁ D ₁
SOLUBILIDAD (%)	TIPO	DEBIL	FUERTE	DEBIL
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₂
DISPERSABILIDAD (vov)	TIPO	FUERTE	MEDIA	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₂ C ₁	A ₁ D ₁
SEDIMENTACION (%)	TIPO	MEDIA	FUERTE	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₂ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₂
DENSIDAD APARENTE (Kg/m ³)	TIPO	FUERTE	FUERTE	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₂ B ₁	A ₂ C ₁	A ₁ D ₁
CALOR TRANSFERIDO (CAL/hr)	TIPO	FUERTE	DEBIL	DEBIL
	NIVEL-OPT.	A ₁ D ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁
EFICIENCIA TERMICA TOTAL (%)	TIPO	MEDIA	MEDIA	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁
EFICIENCIA EVAPORATIVA (%)	TIPO	FUERTE	MEDIA	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁
COSTOS (\$/Kg)	TIPO	DEBIL	DEBIL	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁

Cuadro 25. Interacciones del $L_8 (2^7)$ para muestra de 36° Brix (diluida).

CARACTERISTICA EVALUADA	INTERACCIONES			
		A x B	A x C	A x D
HUMEDAD (%)	TIPO	MEDIA	MEDIA	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁
CAPACIDAD ESPUMANTE (%)	TIPO	FUERTE	MEDIA	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₂	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁
SOLUBILIDAD (%)	TIPO	FUERTE	MEDIA	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁
DISPERSABILIDAD (seg)	TIPO	FUERTE	DEBIL	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₂	A ₂ C ₁	A ₁ D ₂
SEDIMENTACION (%)	TIPO	FUERTE	FUERTE	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₂	A ₁ D ₁
DENSIDAD APARENTE (Kg/m ³)	TIPO	MEDIA	MEDIA	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₂
CALOR TRANSFERIDO (Kcal/hr)	TIPO	MEDIA	MEDIA	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁
EFICIENCIA TERMICA TOTAL (%)	TIPO	MEDIA	MEDIA	MEDIA
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₁	A ₁ C ₁	A ₁ D ₂
EFICIENCIA EVAPORATIVA (%)	TIPO	FUERTE	MEDIA	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₂	A ₁ C ₁	A ₁ D ₁
COSTOS (\$/qt)	TIPO	FUERTE	DEBIL	FUERTE
	NIVEL-OPT.	A ₁ B ₂	A ₂ C ₁	A ₁ D ₁

3.3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ETAPA DE OPTIMIZACIÓN.

Las ecuaciones de predicción calculadas, nos involucran solamente los factores y/o interacciones de mayor efecto para cada característica evaluada, así como el nivel recomendado por el análisis de mayor-mejor o menor-mejor según el caso. El valor reportado como promedio total experimental (T), corresponde al promedio de las determinaciones realizadas por corrida del $L_8 (2^7)$. (Este cálculo se basa en la técnica empleada por Taguchi) (18 y 19). Las ecuaciones correspondientes a la muestra de 14.5° Brix se resumen en el cuadro 26 y en el cuadro 27, se presentan las correspondientes a la muestra de 36° Brix (diluida).

Cuadro 26 Ecuaciones de predicción para muestra de 14.5° Brix.

CARACTERISTICA EVALUADA	ECUACION DE PREDICCIÓN	T. EXP	C.V. (%)
HUMEDAD (%)	$\bar{Y} = A_2C_1 + D_2 \cdot A_2$	3.2	2.64
CAPACIDAD ESPUMANTE (%)	$\bar{Y} = A_2B_2 \cdot A_2 \cdot B_2 + 2T$	96.37	2.64
SOLUBILIDAD (%)	$\bar{Y} = A_2C_2 \cdot A_2 \cdot C_2 + B_2 + D_2$	99.82	2.65
DISPERSABILIDAD (seg)	$\bar{Y} = T + A_2B_1 \cdot A_2 \cdot B_1 + C_2$	27.35	2.65
SEDIMENTACION (%)	$\bar{Y} = 2T + A_2C_2 \cdot A_2 \cdot C_2$	0.16	2.65
DENSIDAD APARENTE (Kg/m ³)	$\bar{Y} = 2T + A_2B_2 \cdot A_2 \cdot B_2$	342.11	2.69
CALOR TRANSFERIDO (Kcal/hr)	$\bar{Y} = A_2B_1 \cdot A_1 \cdot B_1 + 2T$	88,060.86	2.64
EFICIENCIA TERMICA TOTAL (%)	$\bar{Y} = T + (A_1 \cdot T)$	57.44	2.64
EFICIENCIA EVAPORATIVA (%)	$\bar{Y} = A_1 + A_1B_1 \cdot A_1 \cdot B_1 + D_1$	60.25	2.64
COSTO (\$/qt)	$\bar{Y} = A_1 \cdot D_1 + C_1 \cdot A_1$	8.48	2.65

\bar{Y} = valor predicho por la ecuación de predicción.

ESTA TESIS NO DEBE
VOLVER DE LA BIBLIOTECA

Cuadro 27. Ecuaciones de predicción para muestra de 36° Brix (diluida)

CARACTERÍSTICA EVALUADA	ECUACION DE PREDICCIÓN	T. EXP	C.V. (%)
HUMEDAD (%)	$\bar{Q} = B_2 + C_2 + D_2 - 2T$	3.2	2.65
CAPACIDAD ESPUMANTE (%)	$\bar{Q} = A_2 B_2 - A_2 - B_2 + T$	96.25	2.65
SOLUBILIDAD (%)	$\bar{Q} = A_2 B_2 - A_1 C_2 - A_2 - B_2 - C_2 - A_1 + B_1 + 2T$	99.94	2.64
DISPERSABILIDAD (seg)	$\bar{Q} = A_2 B_2 + A_2 C_1 + C_1 + A_1 D_2 + 2T - 2A_2$	17.08	2.64
SEDIMENTACIÓN (%)	$\bar{Q} = A_2 B_1 - A_2 + A_1 C_2 - A_1 - C_2$	0.18	2.64
DENSIDAD APARENTE (Kg/m ³)	$\bar{Q} = B_1 + D_2 - T$	391.44	2.63
CALOR TRANSFERIDO (Kcal/hr)	$\bar{Q} = B_1 + A_1 C_1 - A_1 - C_1 + A_2 D_1 - A_2 - D_1 + 2T$	64.136.73	2.64
EFICIENCIA TÉRMICA TOTAL (%)	$\bar{Q} = A_1 B_2 - T$	54.94	2.63
EFICIENCIA EVAPORATIVA (%)	$\bar{Q} = A_1 + A_1 B_2 - A_1 - B_2 + D_2$	39.89	2.67
COSTO (\$/Kg)	$\bar{Q} = A_1 D_1 + C_1 - A_1$	6.93	2.64

\bar{Q} = valor predicho por la ecuación de predicción.

Las condiciones seleccionadas como óptimas pueden extraerse de los cuadros 28 y 29, para el secado por aspersión de extracto de yuca líquido a 14.5°Brix y 36°Brix (Diluida), respectivamente.

Cuadro 28. Factor-nivel optimo y valor predicho para extracto de yuca en polvo (14.5°Brix)

Característica	Factores-niveles op.	Valor predicho
Contenido de humedad	A ₂ B ₂ C ₁ D ₂	2.975 %
Capacidad espumante	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂	93.75 %
Solubilidad	A ₂ B ₂ C ₁ D ₂	99.90 %
Dispersabilidad	A ₂ B ₁ C ₂ D ₂	17.45 seg.
Sedimentación	A ₂ B ₂ C ₁ D ₂	0.125 %
Densidad aparente	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂	388.025 Kg/m ³
Calor transferido	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁	72,834.39 Kcal/hr
Eficiencia térmica total	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁	57.44 %
Eficiencia evaporativa	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁	62.53 %
Costos	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	6.48 \$/Kg

Cuadro 29. Factor-nivel optimo y valor predicho para extracto de yuca en polvo (36°Brix)

Característica	Factores-niveles op.	Valor predicho
Contenido de humedad	A ₂ B ₁ C ₂ D ₂	0.22 %
Capacidad espumante	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁	101.25 %
Solubilidad	A ₂ B ₁ C ₂ D ₁	99.94 %
Dispersabilidad	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	8.28 seg.
Sedimentación	A ₁ B ₁ C ₂ D ₁	0.15 %
Densidad aparente	A ₁ B ₁ C ₂ D ₂	419.31 Kg/m ³
Calor transferido	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	58,666.69 Kcal/hr
Eficiencia térmica total	A ₁ B ₂ C ₁ D ₂	57.74 %
Eficiencia evaporativa	A ₁ B ₂ C ₁ D ₁	62.99 %
Costos	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	5.73 \$/Kg

La selección del factor-nivel óptimo para la aplicación de la operación unitaria, se basada en los resultados procedentes del análisis de método Taguchi, en primer lugar de las características de calidad de los polvos y segundo por las características dinámicas del proceso. Sin embargo, también se debe tomar en consideración los costos y la producción de polvo (Kg-lt/hr).

Por lo tanto, para la muestra de extracto de yuca líquido con 14.5 ° Brix, los niveles óptimos para los factores estudiados son: A₂ (T.ent. = 230°C), B₂ (T.sal. = 120°C), C₁ (% MD. = 8 %), D₂ (% SGC. = 2%). Con estos niveles óptimos se puede obtener extracto de yuca en polvo con una producción de 0.1853 Kg. de polvo-por litro de líquido/ hr (Ver cuadro 30).

Cuadro 30. Producción (Gramos-Litro/hr). extracto de 14.5° Brix.

Corrida del L ₄ (2 ⁴)	Producción (Grs.Lt)
1	77.74
2	185.31
3	70.09
4	90.09
5	70.09
6	89.52
7	77.74
8	185.31

Cuadro 31. Producción (Gramos-litro/hr). extracto de 36° Brix.

Corrida del L ₄ (2 ⁴)	Producción (Grs-Lt/hr)
1	196.91
2	139.78
3	115.01
4	135.25
5	114.19
6	136.99
7	196.62
8	139.78

Para tener una mejor comprensión de las condiciones correspondientes a cada corrida mencionada en el cuadro anterior, referierase al Capítulo II, Cuadros 8 y 9, página 55.

Los resultados predichos con las condiciones anteriores fueron evaluados, ya que implicaba en algunos casos cambios en ecuaciones y valores de predicción.

Como puede observarse en el cuadro 32, características como capacidad espumante, sedimentación y solubilidad, tienen los más bajos porcentajes de error (2.34%, 3 % y 0.1% respectivamente) relativo al valor predicho por la ecuación; por otro lado las características: Contenido de humedad, dispersabilidad y densidad aparente, registran los más altos porcentajes de error (siendo 15 % el más elevado). No obstante, se considera un % de error menor al 25 % como válido para la técnica de optimización (19).

Cuadro 32. Cuadro comparativo de valores promedio. Extracto de yuca en polvo (14.5°Brix)

Característica	Valor predicho	Corrida confirmatoria*	Error (%)
Contenido de humedad	2.975 %	2.57 %	13.61
Capacidad espumante	96.25 %	98.5 %	2.34
Solubilidad	99.90 %	99.8 %	0.1
Dispersabilidad	20.35 seg.	23.4 seg.	15
Sedimentación	0.165 %	0.17 %	3.0
Densidad aparente	368.35 Kg/m ³	413.02 Kg/m ³	12.13
Calor transferido	68,674 Kcal/hr	67,366 Kcal/hr	2.0
Eficiencia térmica total	55.14 %	57.25 %	3.83
Eficiencia evaporativa	60.25 %	60.35 %	0.2
Costos	6.63 \$/Kg.	6.63 \$/Kg.	0

* Valores analíticos promedio de tres determinaciones. (excepto características dinámicas y costos).

Para la muestra líquida de extracto con 36° Brix, después de diluir con agua destilada en relación volumétrica de 1:1 para obtener 20°Brix; las condiciones óptimas son: A₂ (T.ent. = 230° C), B₁ (T.sal. = 110°C), C₂ (% MD. = 10 %), D₁ (% SGC. = 1%). Esta selección se basa en los atributos calidad del polvo, principalmente como contenido de humedad, solubilidad y capacidad espumante. De acuerdo con el cuadro comparativo de valores (Ver cuadro 33), en la humedad se obtiene un % de error de 7.5, pero en la solubilidad se tiene 0.05 % de error del valor obtenido con el predicho por la ecuación.

Aún cuando se recomienda A₁ en otras 4 características, los resultados predichos y los obtenidos en la corrida confirmatoria manejando A₂ no varían significativamente (desde 1.7 % de error para capacidad espumante, hasta 9.54 % en sedimentación). Con valores de 2.42 a 4.83 % de error se encuentran las características dinámicas del proceso.

Mencionando que la producción (Ver cuadro 31) y el comportamiento observado dentro de la cámara fué el más favorable en éstas condiciones optimizadas para la muestra.

Cuadro 33. Cuadro comparativo de valores promedio. Extracto de yuca en polvo (36°Brix)

Característica	Valor predicho	Corrida confirmatoria*	Error (%)
Contenido de humedad	2.04 %	1.89 %	7.35
Capacidad espumante	98.33 %	100 %	1.7
Solubilidad	99.94 %	99.89 %	0.05
Dispersabilidad	19.06 seg.	20.17 seg.	5.82
Sedimentación	0.325 %	0.294 %	9.54
Densidad aparente	389.23 Kg/m ³	396.255 Kg/m ³	1.8
Calor transferido	63,378 Kcal/hr	66,436 Kcal/hr	4.83
Eficiencia térmica total	54.46 %	55.78 %	2.42
Eficiencia evaporativa	58.64 %	61.235 %	4.43
Costos	7.33 \$/Kg	7.33 \$/Kg	0

* Valores analíticos promedio de tres determinaciones (excepto características dinámicas y costos).

Los valores que corresponden a la corrida confirmatoria de ésta optimización no varían significativamente con los predichos por las ecuaciones de predicción de forma significativa (menos del 10 % de error).

3.3.2. Análisis de diámetro promedio de partícula

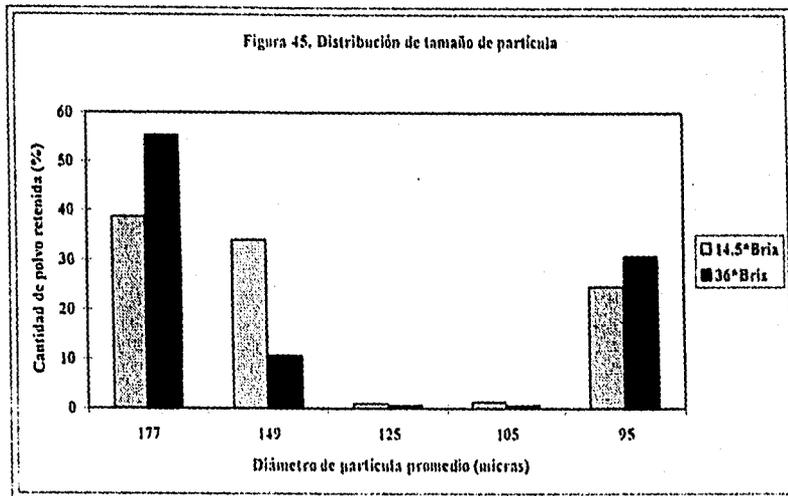
Con las condiciones de la optimización se obtuvo el producto en polvo utilizado para analizar el diámetro de partícula promedio mediante el microscopio óptico, la técnica del procedimiento seguido está descrito en los anexos. También se ocupó una cantidad de muestra para realizar las pruebas experimentales de higroscopicidad de los mismos.

En cuanto a las determinaciones experimentales del diámetro promedio de partícula con el microscopio óptico (Ver resultados promedio en el cuadro 34); estas corresponden a muestras tomadas al azar del polvo que pasó el menor tamiz (diámetro promedio de 95 micras). En la distribución de tamaño (figura 45) se observa un tamaño más homogéneo en las partículas de polvo obtenidas de la muestra líquida de 14.5° Brix., ya que reporta porcentajes de material retenido similares entre los tamices 80 y 100 (38 y 34 % respectivamente). Sin embargo, en partículas finas (diámetro promedio menor a 100 micras) el polvo obtenido del extracto con 36° Brix (diluido), tiene una mayor cantidad de muestra retenida (30,6 %) que la de 14.5°Brix (con 24,6 %).

Cuadro 34. Diámetro de partícula promedio (microscopio óptico) *

Muestra en polvo	Dp (nm)	Dp (µm)
14.5° Brix	198 x 10 ⁻³	0.0198
36° Brix	125 x 10 ⁻³	0.0125

* Valores analíticos promedio de tres lecturas.



Lo observado en el microscopio óptico nos proporciona un análisis insuficiente en la información estructural y conformacional de una partícula aislada de polvo. Sin embargo, de acuerdo a otras investigaciones donde se evaluaron mezclas de maltodextrina y goma arábiga para material de la pared encapsulante (17,58), se pudo haber esperado una superficie de microcapsula con características similares a las observadas con el microscopio electrónico en estas mezclas (17), es decir, con pocas rupturas y con dentaciones (zonas hundidas pero continuas), los poros de la pared serian poco notorios manifestando una capa externa rugosa, lo cual explicaría la facilidad de continuarse la evacuación del agua ocluida y la resistencia a la rehidratación espontánea de la misma con la humedad del aire, que en un principio permitiría pensar, no en diámetro de partícula, si no en el efecto de la superficie específica.

Por otra parte, el tipo de mezclas conseguidas con la adición de los almidones modificados, podrían esperarse sean mezclas aleatorias según referencia bibliográfica (6); es decir, con tamaños definidos dentro de un intervalo, presentando un patrón de mezcla atribuido a las fuerzas gobernantes (Van der Waals) y al azar.

3.3.3. Análisis de isotermas de adsorción.

Debido a la importancia que muestra la estabilidad de los productos biológicos como los alimentos y en este caso, del extracto de yuca en polvo durante el procesamiento, almacenamiento y distribución; se decidió determinar las isotermas de adsorción de agua, de los polvos obtenidos de la corrida confirmatoria después de la optimización de las variables del proceso de secado por aspersión.

Las isotermas de adsorción del extracto de yuca en polvo (14.5° y 36° Brix) se muestran en las figuras 46 y 47, respectivamente. Como puede verse, se obtienen en ambos polvos isotermas de adsorción de forma sigmoidea. (tipo II , según clasificación Braunauer) (44).

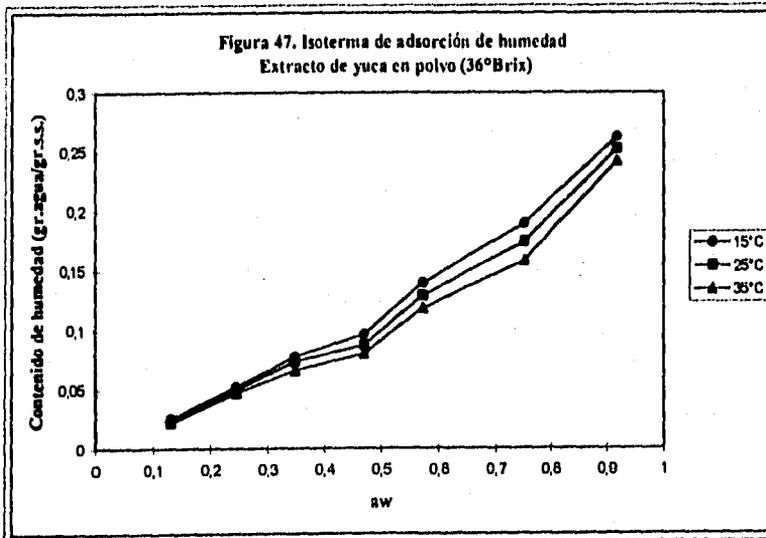
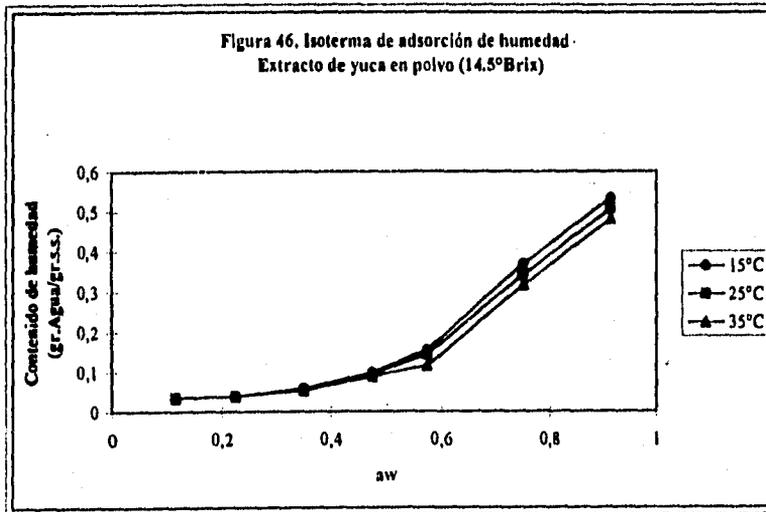
Se observa que para el intervalo de a_w investigado, el efecto de la temperatura sobre la adsorción de agua concuerda con un fenómeno ya observado (1, 3), en el cual la cantidad de agua adsorbida decrece conforme la temperatura se aumenta, a una a_w determinada. O también expresado de otra forma, indica que se puede tener la ventaja de almacenar el producto con un contenido de humedad mayor conforme se disminuye la temperatura de almacenamiento a una a_w constante. En las curvas obtenidas (figuras 46 y 47), el efecto más pronunciado de termodependencia se presenta en altos valores de actividades acuosas.

Extracto en polvo obtenido del extracto líquido de 14.5° Brix.

La manifestación de la dependencia en temperatura sobre la a_w del polvo se empieza a presentar a partir del segundo punto de a_w graficado ($a_w = 0.225$) en las tres temperaturas evaluadas (15°C, 25°C y 35°C) y adelante de $a_w = 0.5$. En la mayor temperatura (35°C) observamos un incremento de a_w de aprox. 0.08, desde el punto correspondiente a la temperatura inferior (25° C). La misma inclinación entre las tres isotermas se presenta a partir del punto de $a_w = 0.575$. Sin embargo, ésta cambia en el intervalo de $0.75 < a_w > 0.91$ en el cual las tres isotermas se incrementan aproximadamente 0.03 en a_w a un contenido de humedad constante. Esto se debe principalmente a que para las más altas temperaturas, mayor resulta la energía cinética de la moléculas de agua adsorbidas en el alimento; y por lo tanto, mucho menor es la cantidad de agua adsorbida a una a_w dada (48).

Extracto en polvo obtenido del extracto líquido de 36° Brix.

Aún teniendo un mismo intervalo de a_w , la muestra no captó más de 0.27 grs. agua /grs. de sólido seco, para ninguna de las temperaturas evaluadas. (Una diferencia muy notoria entre los extractos en polvo obtenidos de ambas concentraciones).



Esto se debe a la concentración inicial del extracto líquido, que al obtenerse en polvo, puede presentar en algunas a_w la mayor influencia de fuerzas de enlace entre sólido-sólido en vez de sólido-agua (44,62), con esto no permitió la adsorción de agua a un nivel similar a la muestra del extracto líquido con menor contenido de sólidos.

Los modelos teóricos empleados para interpretar matemáticamente el proceso de adsorción en ambas muestras se reportan en los cuadros 35 y 36. Donde se muestran las ecuaciones obtenidas para cada temperatura. Se usó la ecuación de Oswin, por ser la forma más efectiva de evaluar el comportamiento de los enlaces de agua de adsorción a lo largo del intervalo de actividades acuosas y porque ha sido empleada exitosamente (2, 12,24,27,30, y 44) para describir las isotermas de tipo sigmoideo.

Cuadro 35 Ecuaciones obtenidas para el extracto de yuca en polvo (14.5°Brix).

Modelo empleado	Temperatura (°C)	Ecuación obtenida	Error (%)
Oswin*	15	$M = -2.18024 (a_w / 1 - a_w)^{0.9106}$	19.057
	25	$M = -2.20798 (a_w / 1 - a_w)^{0.9931}$	18.371
	35	$M = -2.25543 (a_w / 1 - a_w)^{0.9931}$	17.979
B.E.T.	15	$M = a_w / [(4.1870 + (11.2213) a_w) (1 - a_w)]$	10.968
	25	$M = a_w / [(4.1792 + (12.2681) a_w) (1 - a_w)]$	10.846
	35	$M = a_w / [(3.9127 + (14.4023) a_w) (1 - a_w)]$	10.004
G.A.B.*	15	$M = 0.2627 a_w / [(1 - 1.00653 a_w)(1 + 3.0097 a_w)]$	25.259
	25	$M = 0.2654 a_w / [(1 - 1.00866 a_w)(1 + 3.2412 a_w)]$	24.858
	35	$M = 0.2998 a_w / [(1 - 1.01951 a_w)(1 + 4.4737 a_w)]$	24.249

*Datos obtenidos por el programa software empleado.

Cuadro 36. Ecuaciones obtenidas para el extracto de yuca en polvo (36°Brix).

Modelo empleado	Temperatura (°C)	Ecuación obtenida	Error (%)
Oswin*	15	$M = -2.36907 (a_w / 1 - a_w)^{0.9261}$	17.16
	25	$M = -2.42798 (a_w / 1 - a_w)^{0.91619}$	15.918
	35	$M = -2.49709 (a_w / 1 - a_w)^{0.9111}$	15.36
B.E.T.	15	$M = a_w / [(3.9824 + (10.1020) a_w) (1 - a_w)]$	4.5843
	25	$M = a_w / [(3.9835 + (11.7398) a_w) (1 - a_w)]$	5.8573
	35	$M = a_w / [(4.1196 + (13.4273) a_w) (1 - a_w)]$	5.555

*Datos obtenidos por el programa software empleado.

Los bajos porcentajes de error (15-19 %) indican una interpretación adecuada y aplicación válida del modelo para obtener contenidos de humedad a diferentes actividades de agua y temperaturas. Se observa una relación inversa entre el valor de la constante en la ecuación Oswin conforme se aumenta la temperatura evaluada, lo cual tendría el significado físico de restringirse la adsorción de moléculas de agua en la superficie del alimento a mayor temperatura.

Aplicación de las ecuaciones B.E.T. y G.A.B.

Se usaron las ecuaciones de modelos como B.E.T. y G.A.B. debido a que nos proporcionan los contenidos de humedad en monocapa, que indican el contenido de humedad óptimo para tener la máxima estabilidad en el almacenamiento de alimentos (44, 62) y su dependencia con la temperatura.

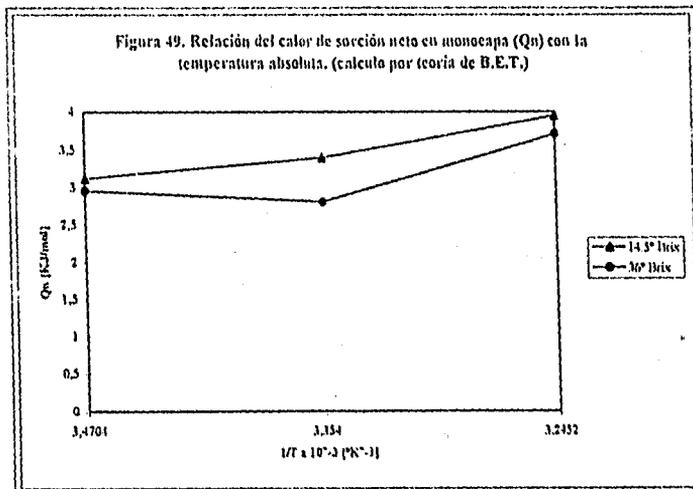
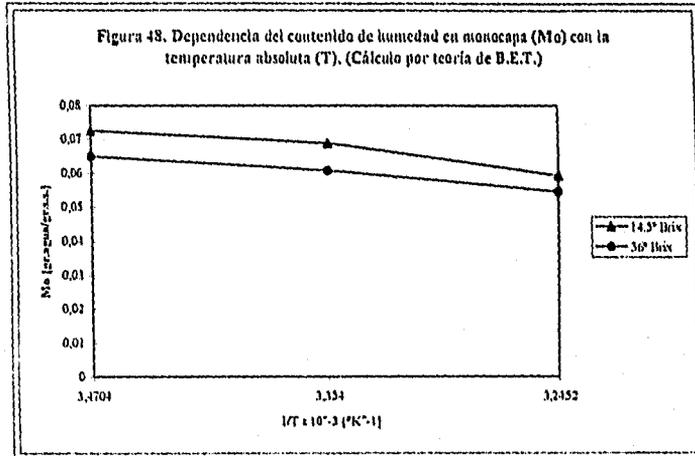
La ecuación de G.A.B. es una de las más ampliamente usadas, por ser uno de los modelos teóricos para evaluar los contenidos de humedad en monocapa en alimentos (1,30,44). Es una ecuación de tres parámetros, que ha sido aceptada y usada por todos los investigadores en Europa (30). El software utilizado contiene la ecuación de G.A.B. y se obtuvieron las ecuaciones (cuadro 33) sustituyendo los parámetros determinados. En esta ecuación todos los datos de la isoterma se involucran ($0.11 < a_w < 0.92$); mientras que la ecuación de B.E.T. sólo incluye desde el menor valor de a_w hasta $a_w = 0.5$.

En el cuadro 37 se muestran los valores de humedad de monocapa para los extractos en polvo evaluados. Se observó que el contenido de humedad en monocapa decrece con el incremento de la temperatura para ambas muestras. (Ver gráfico de figura 48). El valor de humedad en monocapa calculado por la ecuación de B.E.T., representa la extensión de las moléculas de agua a causa del incremento en la temperatura, además de la disminución del número total de sitios activos para la adsorción de agua, que en general, son cambios físicos y químicos inducidos por el efecto de la temperatura. Estos cambios indican también que a menor contenido de humedad en monocapa se requiere aumentar la energía del sistema para retirar o incorporar una molécula de agua, éste fenómeno está representado en el gráfico de la figura 49; donde el calor de sorción neto en monocapa presenta una relación directa proporcional con la temperatura absoluta. A excepción del polvo de 14.5 ° Brix cuyo gráfico indica que en intervalo de 15° a 25 ° C de temperatura el calor de sorción en monocapa no varía por mantenerse termodinámicamente estable, debido al mínimo cambio físico o químico en el mismo. Cabe mencionar que en los gráficos de las figuras 48 y 49 se refiere como 14.5° Brix y 36° Brix, a los extractos en polvo que se obtuvieron del secado de los extractos líquidos con tal concentración inicial, respectivamente.

Cuadro 37. Contenidos de humedad en monocapa a diferentes temperaturas, evaluados por las ecuaciones de B.E.T. y G.A.B. para los extractos en polvo.

Extracto de yuca	Temperatura (° C)	Modelo de B.E.T.	Modelo de G.A.B.
14.5 ° Brix	15	0.0649	0.06541
	25	0.0608	0.06246
	35	0.0546	0.05459
36 ° Brix	15	0.0710
	25	0.0636
	35	0.0569

Los espacios vacíos indican que en el análisis por medio del software, el modelo tuvo por resultado, % de error no aceptables.



El Calor de Sorción.

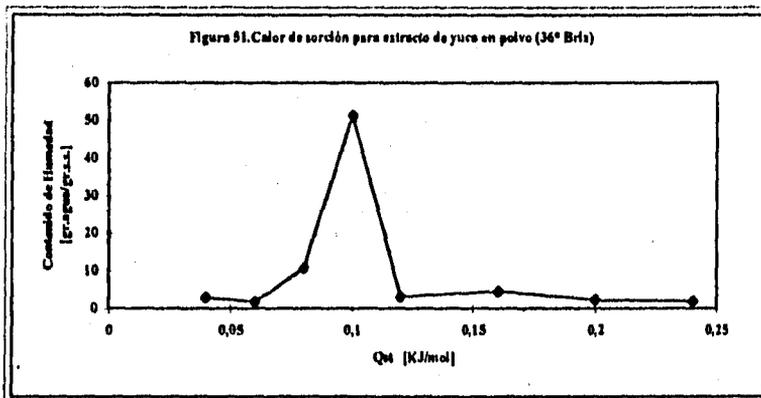
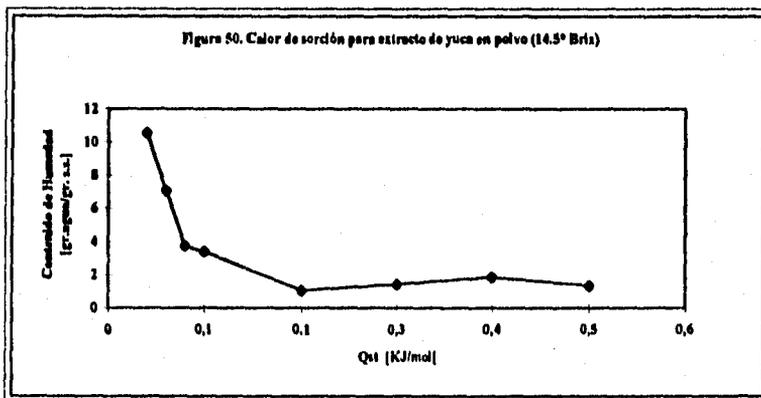
El calor de sorción (Q_s), es un parámetro termodinámico que se considera en la evaluación de la estabilidad de los sistemas biológicos (62). Es función directa de la temperatura, la capacidad de adsorción de agua y representa el calor implicado en la adsorción y en la variación de temperatura (44,62).

En el cuadro 38 se muestran las variaciones del calor de sorción para los extractos de yuca en polvo en las condiciones de temperaturas evaluadas. En el cálculo de los Q_s se deben determinar las actividades de agua manteniéndose constante los contenidos de humedad, los evaluados aquí fueron los siguientes: 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 grs.agua/gr.sólido seco; para la muestra en polvo de 14.5°Brix, mientras que para la muestra de 36°Brix fueron: 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24 gr.agua/gr.sólido seco, con la finalidad de abarcar los niveles de humedad registrados dentro del análisis de las isotermas de adsorción.

Cuadro 38. Calores de sorción de humedad, calculados para los extractos de yuca en polvo.

Extracto de 14.5° Brix		Extracto de 36° Brix	
Contenido de humedad (gr.agua/gr.s.s.)	Calor de sorción (KJ/mol)	Contenido de humedad (gr.agua/gr.s.s.)	Calor de sorción (KJ/mol)
0.04	10.57	0.04	2.81
0.06	7.08	0.06	1.81
0.08	3.74	0.08	10.78
0.10	3.40	0.10	51.27
0.20	1.05	0.12	3.11
0.30	1.44	0.16	4.53
0.40	1.86	0.20	2.23
0.50	1.33	0.24	1.94

Se observa que para el polvo producido a partir del extracto de 14.5° Brix, el valor del calor de sorción alcanza su máximo al menor contenido de humedad (0.04 gr.agua/gr. sólido seco), esto se debe a que abajos contenidos de humedad las interacciones sólido-agua en los sitios activos de sorción son muy fuertes (moléculas de agua fuertemente unidas), de tal forma que la energía requerida (calor de sorción) para eliminar o agregar una molécula de agua de la o en la matriz de la partícula es muy elevado. Sin embargo, el valor del Q_s va disminuyendo conforme se alcanza las multicapas de agua adsorbida, debido a que se reducen las interacciones sólido-agua en la superficie de la partícula.



Por otro lado, el polvo producido del extracto con 36° Brix iniciales, presenta un valor máximo de calor de sorción en un contenido de humedad de 0.10 gr.agua/ gr.sólido seco. Este fenómeno puede atribuirse a los cambios físicos y químicos generados por la variación de temperatura, se explica que la disponibilidad de los sitios activos de adsorción puede verse reducida en ciertos intervalos de actividad acuosa y temperaturas, por un cambio conformacional de la superficie en la matriz del alimento, de acuerdo con Rizvi (44), los puntos específicos de adsorción se saturan a determinados contenidos de humedad y en este nivel se registran los más altos calores de sorción netos. Por arriba o por debajo del contenido de humedad mencionado el calor de sorción tiene valores menores indicándose una estabilidad termodinámica adecuada del sistema.

En general, de acuerdo a los contenidos de humedad en monocapa obtenidos por la ecuación de B.E.T. se recomienda un almacenamiento a 25° C de temperatura y a una humedad relativa de 30-35 %. Podría ser adecuado mantenerlo empacado en material de polietileno impermeable al intercambio de humedad con el exterior, pero cuidando no elevar la temperatura de la recomendada o reducirla, pues los efectos de condensación- evaporación podrían causar cambios de estabilidad de la muestra.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES GENERALES

- Se alcanzó el objetivo general de lograr la aplicación del secado por aspersión del extracto de yuca líquido a dos diferentes concentraciones (° Brix) y de obtener la optimización de las variables del proceso mediante la ingeniería de calidad (método Taguchi). Con ello se obtuvo un producto deshidratado con características de calidad aceptables (comparando algunas con las reportadas de un producto deshidratado por congelación (13) y por la confiabilidad de reproducción en los resultados obtenidos de este estudio).

Por lo tanto, se mencionan las variables óptimas de operación y las características de calidad/dinámicas y los costos evaluados en la aplicación del secado por aspersión para la obtención de extracto de yuca en polvo:

• Para el extracto de yuca líquido con 14.5 ° Brix, los niveles óptimos para los factores estudiados son: A₂ (T.ent. = 230° C), B₁ (T.sal. = 120° C), C₁ (Adición de M.D. = 8 %), D₂ (Adición de S.G.C. = 2%).

Cuadro de conclusiones con las características evaluadas.
Extracto de yuca en polvo (14.5° Brix)

Característica	Valor promedio
Contenido de humedad	2.975 %
Capacidad espumante	96.25 %
Solubilidad	99.90 %
Dispersabilidad	20.35 seg.
Sedimentación	0.165 %
Densidad aparente	368.35 Kg/m ³
Calor transferido	68,674 Kcal/hr
Eficiencia térmica total	55.14 %
Eficiencia evaporativa	60.25 %
Costos	6.63 \$/Kg

• Para el extracto de yuca con 36° Brix, después de diluir con agua destilada en relación volumétrica de 1:1 para obtener 20° Brix; Las variables de operación óptimas son: A₂ (T.ent. = 230° C), B₁ (T.sal. = 110° C), C₂ (Adición de M.D. = 10 %), D₁ (Adición de S.G.C. = 1%).

**Cuadro de conclusiones con las características evaluadas.
Extracto de yuca en polvo (36° Brix)**

Característica	Valor promedio
Contenido de humedad	2.04 %
Capacidad espumante	98.33 %
Solubilidad	99.94 %
Dispersabilidad	19.06 seg.
Sedimentación	0.325 %
Densidad aparente	389.23 Kg/m ³
Calor transferido	63.378 Kcal/hr
Eficiencia térmica total	54.46 %
Eficiencia evaporativa	58.64 %
Costos	7.33 \$/Kg

- Se concluye que para obtener el secado se requiere de la encapsulación de la partícula seca del extracto natural, y que la mezcla de maltodextrina (Amidex 10) con goma arábiga modificada (Spray gum "C") es, de acuerdo con las observaciones y los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, una combinación adecuada para encapsular el extracto de yuca y reducir su naturaleza higroscópica, a un nivel que permite su secado y recolección de forma óptima.
- La dilución del extracto de yuca con 36° Brix se considera indispensable para obtener los 20° Brix de concentración. Si esta no se llega a realizar, se presentarían los problemas de bombeo y además, las condiciones de adición de coadyuvantes de secado serían inadecuada para el secado por aspersión del mismo.
- El suministro de un aire secundario como el del aire-barredor, logró desprender el polvo dentro de la cámara de secado y evitando la adherencia del mismo a la superficie, una vez que se encapsuló la partícula del extracto
- El éxito alcanzado al emplear la metodología de las pruebas experimentales preliminares, se debe a la base teórica y de conocimientos prácticos de la operación unitaria, ya que las combinaciones de las variables evaluadas dentro del método Taguchi, proporcionaron información importante y definitiva para la optimización de las variables del proceso.
- En cuanto a la estabilidad del producto deshidratado que se obtuvo de ambos extractos, el análisis de higroscopicidad nos mostró que se trata de un polvo con comportamiento sigmoideo (o tipo II) en la curva de adsorción de humedad, típico en los sistemas biológicos de alimentos. En general, la mayor estabilidad para polvos se registraría en los niveles de contenido de humedad correspondientes a la monocapa de moléculas de agua adsorbidas en la superficie del alimento, ello se debe a que en estos intervalos de contenidos de humedad, la

actividad acuosa reduce al mínimo o nulifica las reacciones de deterioro (mediante reactantes solubles y/o microorganismos presentes).

-Por otro lado, la información puede indicar las condiciones de almacenamiento adecuadas, ya que a una actividad acuosa constante (% Humedad relativa en el ambiente) se permite un almacenamiento con mayor contenido de humedad si se reduce la temperatura en intervalos que no lleguen a conservar por frío (15° C); lo más recomendable sería mantenerse dentro del intervalo de contenido de humedad en monocapa, para asegurar un mayor período de estabilidad en el producto.

- De lo anterior se concluye que las mejores condiciones de almacenamiento para mantener por mayor período la estabilidad del extracto de yuca en polvo (ambos) son: un ambiente circundante con humedad relativa entre 25-30 % y permitir sólo temperaturas entre 15- 35° C.

- Los costos reportados son a nivel planta piloto, en un nivel industrial los costos se elevarían por la fuerte inversión inicial en equipo y servicios requeridos. Sin embargo, por el lado de los condyuvantes y manejo de materia prima se vería reducido el costo por ser mayor cantidad la que se requiere. En el secado el costo principal es el de la energía empleada para calentar el aire de secado, dicho costo es proporcional al agua a evaporar, por lo que las soluciones de baja concentración no sólo son caras, sino que incrementan el costo de recuperación de polvos por la necesidad de instalar sistemas más eficientes para recuperar finos. El deshidratar soluciones de baja concentración es muy caro y se realiza sólo con productos rentables como por ejemplo hormonas, enzimas de bajo peso molecular y antibióticos de uso en la industria farmacéutica.

- Se debe tomar en cuenta que el éxito o fracaso de un producto dependerá de la medida en que se cumplan el mayor número de atributos de calidad así como su costo y precio final.

- El resultado de esta investigación nos proporciona una nueva presentación de extracto de yuca en polvo, con un precio aceptable a nivel piloto y otorgando las ventajas del secado por aspersion a la industria procesadora de extractos naturales con finalidad de aplicación en los alimentos. La Ingeniería de calidad avala que los resultados registrados en la optimización de las variables involucradas aquí, son reproducibles y que los polvos tienen una calidad aceptable y comparable con la de otros extractos deshidratados por cualquier operación diferente(13).

-Sin embargo una recomendación sería probar diferentes materiales encapsulantes que tengan un mejor efecto sobre la severidad de las condiciones de manipulación y almacenamiento de polvos.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXOS

1. SECUENCIAS DE CALCULOS

Las secuencias de cálculo que a continuación se presentan, son fundamentales para la obtención de los resultados. Para ello se desglosan con la finalidad de dar claridad a esta parte del trabajo.

1.- Balance de Energía:

$$\text{Ecuación general: } Q = G_a(Ea_1 - Ea_2) + Ms(Es_1 - Es_2).$$

2.- Balance de Humedad.

$$\text{Ecuación general: } G_a(Ha_2 - Ha_1) = Ms(X_{S1} - X_{S2})$$

3.- Eficiencia Evaporativa.

$$\text{Ecuación: } \eta_{\text{evap}} = (T_1 - T_2 / T_1 - T_{\text{sat}})(100).$$

4.- Eficiencia Térmica Total.

$$\text{Ecuación: } \eta_T = (T_1 - T_2 / T_1 - T_0)(100).$$

5.- Diámetro volumétrico medio de la gota asperjada.

$$\text{Ecuación: } D.M.V. = K G_L^{0.24} / (N' d)^{0.83} (n' h')^{0.12} ..$$

2. CALCULO DE COSTO / GRAMO.

1.- Potencia requerida de atomización :

$$\text{Ecuación: } P_{\text{atm}} = (1.02^{-8}) \times (w) \times (N \times Dr)^2 .$$

2.- Producción :

$$\text{Ecuación: } P = Q \times []$$

ANEXOS

3.- Costo /Kg. :

$$\text{Ecuación: Costo /kilogramo} = (1/Q) \times (1/[]) \times Kw \times \$$$

3. RELACIONES PSICROMETRICAS.

SECUENCIA DE CALCULO:

1.- Conocer los datos necesarios para entrar y hacer uso de la carta psicrométrica; tales datos son los siguientes:

TEMPERATURA DE BULBO SECO (TBS): Tanto de la entrada como a la salida del aire (T_{ent} y T_{sal}).

TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO (TBH): A la salida del aire.

VELOCIDAD DEL AIRE: A la salida del mismo.

% H.R.: Aire atmosférico a la entrada.

2.- Con los valores anteriores obtener los siguientes datos a partir del uso de la carta psicrométrica.

-HUMEDAD ABSOLUTA: H_a , tanto a la entrada ($H_{a,ent}$) como a la salida ($H_{a,sal}$)

-HUMEDAD RELATIVA: H_{rel}

-VOLUMEN HUMEDO: $V_{H} = (22.4 + 273) + (1/29 + H_{a,ent}/18)$

-CALOR HUMEDO: $C_s = 0.24 + 0.45 H_a$

-GASTO DE AIRE SECO: $G_a = * \text{Vol. aire} / V_H (=) \text{Kg a.s./hr}$

*Vol aire= Velocidad del aire/area de salida (=) m^3 aire húmedo/hr.

Nota: Hay que mencionar que la humedad absoluta que se obtuvo fue a una presión atmosférica de 1 atm, la cual no es la que corresponde al municipio de Cuautitlan Izcalli (lugar donde se desarrollo el trabajo $P=585$ mmHg) por lo que hubo que corregir este valor mediante la utilización de la siguiente fórmula:

$$H_{a(B)} = H_{a(A)} + 0.622 P'_w (1/(P_T - P'_w) - 1/(760 - P'_w))$$

4. Programas de calculadora científica utilizados en los cálculos y balances.

• Balance de energía.

Ecuación empleada :

$$Q = G_a (H_{a1} - H_{a2}) + S_s (H_{s1} - H_{s2})$$

$$H_s = (c_{ps} + X c_{pl}) (T_a - T_o)$$

$$H_a = (0.25 + 0.45 Y') (T_a - T_o) + \lambda_0 Y'$$

ANEXOS

" B. E. ",

Lbl 1 : " cps [Kcal + Kg ss ° C] = "? → A : "X [LIQ] = "? → Y : "cpl [Kcal + Kg ° C] "? → B : "Ta1 [° C] = "? → C : "To [° C] = "? → D : "Hx [Kcal + Kg] = "((A + (Y x B)) x (C - D)) → E ,

" cps [Kcal + Kg ss ° C] = "? → F : "X [LIQ] = "? → Z : "cpl [Kcal + Kg ° C] "? → G : "Ta2 [° C] = "? → H : "To [° C] = "? → I : "Hs [Kcal + Kg] = "((F + (Z x G)) x (H - I)) → J ,

"Ta1 [° C] = "? → L : "To [° C] = "? → M : "Lo [Kcal + Kg H₂O] = "? → N : "AD [Kg H₂O + Kg as] = "? → O : "HME [Kg H₂O + Kg as] = "? → K : " HAE [Kcal + Kg as] = "(((0.25) + (0.45 x K)) x (L - M)) + (N x O) + (48.2017) → P ,

"Ta2 [° C] = "? → R : "To [° C] = "? → S : "Lo [Kcal + Kg H₂O] = "? → T : "AE [Kg H₂O + Kg as] = "? → U : "HMS [Kg H₂O + Kg as] = "? → Q : " HAS [Kcal + Kg as] = "(((0.25) + (0.45 x Q)) x (R - S)) + (T x U) → V ,

" Ga [Kg as + hr] = "? → W : "Ss [Kg ss + hr] = "? → X ,

" Q [Kcal + hr] = "(((W + 133.3054) x (P - V)) + (X x (E - J))) ,

Go to 1

- Corrección para la humedad del aire.

Ecuación de corrección :

$$Ha_{(B)} = Ha_{(A)} + 0.622 P'w (1 / (P_T \cdot \cdot - P'w) - 1 / (760 - P'w))$$

" H. A. ",

Lbl 1 : " Ha [Kg H₂O + Kg ss] = "? → A : "Pw [mmHg] = "? → B : (A + ((0.622 x B) x (1 ÷ (585 - B)) - (1 + (760 - B)))) → C ,

Go to 1

- Gasto de aire seco durante el proceso de secado.

Ecuación empleada :

$$Ga = (Vel x Area) ÷ V h$$

" GASTO",

Lbl 1 : " Vel [m + seg] = "? → A : "Vh [m³ + Kg] = "? → B : (((A x 2.21 x 10⁻³) + B) + 133.3054) → C ,

Go to 1

- Eficiencia evaporativa.

Ecuación empleada :

$$\eta \text{ Evap} = ((T_{ENT} - T_{SAL}) + (T_{ENT} - T_{SAT}) X 100)$$

ANEXOS

" EFL.EVAP.",

Lbl 1 : " Tent [° C] = " ? → A : " Tsal [° C] = " ? → B : " Tbh [° C] = " ? → C : (((A - B) ÷ (A - C)) X 100) → D ,

Go to 1

• Eficiencia térmica total.

Ecuación empleada :

$$\eta \text{ Total} = ((T_{ENT} - T_{SAL}) \div (T_{ENT} - T_{AMB})) \times 100$$

" EFL.TOT.",

Lbl 1 : " Tent [° C] = " ? → A : " Tsal [° C] = " ? → B : " Tamb [° C] = " ? → C : (((A - B) ÷ (A - C)) X 100) → D ,

Go to 1

♣ NOTA :

La calculadora usada fué una CASIO Modelo 7700.
con lenguaje de programación Link .

5 HIGROSCOPICIDAD (Isotermas de adsorción):

La metodología para la determinación de higroscopicidad en los polvos obtenidos de la optimización de extracto de yuca en polvo (tanto la muestra de 14.5° Brix como la de 36° Brix) producidos por secado por atomización, es la siguiente:

1.- Obtención de las isotermas de adsorción.

Los isotermas de adsorción de humedad de los polvos de extracto de yuca, para muestras líquidas de 14.5 y 36° Brix, se obtuvieron a tres diferentes temperaturas de interés: 15°, 25° y 35° C. El ajuste de la actividad de agua de las muestras en polvo, se realizó mediante el método diferencial usando soluciones saturadas de sales seleccionadas para cubrir un intervalo de a_w de 0.11 a 0.98, para la obtención de los datos de adsorción.

La técnica del método diferencial para ajuste de la a_w del polvo fué la siguiente:

1) determinar de forma experimental las a_w (% H.R del medio ambiente) proporcionadas por las soluciones salinas saturadas seleccionadas para el rango de estudio (0.11-0.98 a_w) a las diferentes temperaturas a manejar.

ANEXOS

Se realizó empleando un higrómetro capilar AQUALAB, para medir la presión parcial de vapor de agua en el ambiente que rodea la solución salina saturada, se controlaron las temperaturas externamente mediante la circulación de agua con un baño termostático HAKE. Las temperaturas fueron controladas a 15°, 25° y 35° C; las lecturas registradas a cada temperatura por cada una de las soluciones salinas se promediaron para mantener constante el valor de a_w .

Se pueden tomar como estándares las a_w de las soluciones salinas saturadas a las diferentes temperaturas del cuadro 1 (pagina 4, capítulo 1). Pero siempre es necesario asegurar el valor real producido de a_w a las condiciones de presión total a la que se experimenta y el efecto sobre la dependencia de estos valores al variar la temperatura.

Las sales seleccionadas para este estudio fueron las siguientes:

SALES SATURADAS	a_w (*)
Cloruro de Litio	0.115
Aceitao de Potasio	0.225
Cloruro de Magnesio	0.335
Carbonato de Calcio	0.435
Nitrato de magnesio	0.580
Cloruro de Sodio	0.750
Nitrato de Potasio	0.850
Sulfato de Amonio	0.980

(*) a_w de las sales a temperatura de 25° C.

Se mantuvieron constantes las actividades de agua proporcionadas por las soluciones de sales saturadas, para las tres diferentes temperaturas, con esto se logra evaluar solamente el efecto de la temperatura sobre los datos de sorción obtenidos para las muestras en polvo.

3) Se prepararon ambas muestras en polvo homogenizandolas en tamaño de partícula, haciéndolas pasar a través de una malla 80 de la Serie Taylor.

4) Se colocaron, por triplicado, cada una de las muestras en polvo (1 gr. de muestra, base húmeda) obtenidas por muestras líquidas de 14.5° Brix y 36° Brix, en contenedores de malla de acero inoxidable (760 mesh) y de forma simultánea dentro de dispositivos montados para crear una atmósfera con % de humedad relativa y temperatura interiores controlados.

5) Sucesivamente se fuè incrementando el valor de la actividad de agua en el medio ambiente que rodeaba cada muestra (para ambos polvos), sin cambiarla. Para alcanzar el equilibrio se mantuvo la muestra por 36 Hrs. en temperaturas de 15° C y para las temperaturas de 25° y 35° C un periodo de 24 Hrs.

ANEXOS

Después de cada equilibrio se evalúa el contenido de humedad en la muestra (base seca: [gr.agua/gr.s.s.]) sobre la obtención de un peso de ganancia constante en el equilibrio a la a_w correspondiente.

Ya que en la práctica no se logra un equilibrio absoluto, en esta parte se aplicó la técnica sugerida por Lang (44) en la que se puede acelerar el intercambio de humedad reduciendo la distancia física entre la muestra en polvo y la solución salina equilibrante, con esto se trató además de disminuir efectos sobre la muestra debidos a varios cambios degenerativos, al transcurrir el tiempo de experimentación.

El método aplicado para registrar los datos como constantes fué el gravimétrico, en el cuál se realizan las pesadas sucesivas, y hasta que la diferencia entre dos datos consecutivos fuera menor a la sensibilidad de la balanza utilizada, se consideró el peso obtenido como constante en el equilibrio.

6) Se construyen las isotermas de adsorción de humedad. El eje de las ordenadas tiene los datos experimentales de actividad de agua, y los datos de las abscisas corresponden al contenido de humedad [gr.agua/gr.s.s.] registrado en la muestra a cada temperatura.

2.-Descripción teórica de las Isotermas de Sorción de Humedad.

1) Una vez obtenido los isotermas de sorción a diferentes temperaturas para cada muestra, se analizan los datos con los métodos teóricos propuestos. Para la realización de éste análisis por diferentes ecuaciones, se utilizó el software ISOCOM. Que fué desarrollado por el Dr. Alvaro Garcia Uriarte, de la Universidad de Las Américas de Puebla. Sin embargo, fué necesario el cálculo a parte de los parámetros de la ecuación B.E.T. ya que el programa analiza los datos en un intervalo de $0.1 < a_w < 1.0$, y en esta ecuación se requieren datos unicamente hasta $a_w = 0.5$.

Los métodos y ecuaciones aplicadas como recomendables para la interpretación teórica de los isotermas obtenidos son:

① El método de Oswin.

$$M = C_1 (a_w / (1 - a_w))^n$$

② El método de B.E.T. (Brunauer-Emmett-Teller).

$$3a_w / (1 - a_w) M = 1/CM_0 + (C - 1) a_w / CM_0$$

ANEXOS

③ El método de G.A.B. (Guggenheim-Anderson-de Boer).

$$M/M_0 = CKaw / [(1 - Kaw)(1 - Kaw + CKaw)]$$

2) La secuencia de cálculo para registrar los parámetros de interés en las ecuaciones anteriores se realizó como sigue:

a) Para cada ecuación se realiza la linearización empleando los datos experimentales obtenidos, y fué usado el metodo de mínimos cuadrados para ello.

b) Una vez obtenidos los valores de las constantes y de regresión lineal, se registran los valores de actividad de agua en las ecuaciones obtenidas para predecir los nuevos contenidos de humedad.

c) Los valores de contenido de humedad predichos servirán para evaluar el % de error de la ecuación para poder describir matemáticamente el comportamiento del proceso de sorción.

La ecuación empleada para evaluar el % de error es.

$$[(M_{pred} - M_{exp}) / M_{pred}] \times 100 = \% \text{ Error.}$$

Donde:

M_{exp} = valor obtenido experimentalmente. [gr.agua/gr.s.s.]

M_{pred} = Valor predecido por la ecuación. [gr.agua/gr.s.s.]

Es importante mencionar que este % de error se evaluó como la desviación estandar de los valores promedios experimentales y los predecidos por la misma ecuación, por lo que se consideran recomendables las ecuaciones con menor % de error para describir, matemáticamente, el comportamiento del proceso de adsorción de humedad sufrido por los polvos de los extractos.

3.- Energía del Comportamiento Higroscópico en los polvos.

El cálculo de los parámetros que nos permiten inferir en la evaluación de la energía requerida para adsorber o liberar moléculas de agua de la matriz del polvo, se realizó de la siguiente manera:

1) De los resultados de las ecuaciones recomendadas para describir los isoterms obtenidos, se registran las a_w de los polvos correspondientes a los contenidos de humedad seleccionados.

ANEXOS

2) Se aplica la ecuación que sigue la forma de cálculo de calor propuesta por Clausius-Clapeyron:

$$\ln (aw) = (H_{ads} - H_{cond})/R (1/T) + C$$

De donde:

$$(H_{ads} - H_{cond}) = Q_{st} = \text{Calor Isostérico Total [KJ/Mol]}.$$

$$R = \text{Constante de los gases = [KJ/Mol } ^\circ\text{K]}.$$

$$T = \text{Temperatura del equilibrio= [} ^\circ\text{K]}.$$

$$C = \text{Constante de regresión.}$$

3) Se linealiza la ecuación con los datos de $\ln (aw)$ vs. $1/T$, la pendiente obtenida para cada contenido de humedad seleccionado a una temperatura sera utilizada para proseguir en el cálculo del calor isostérico total:

$$m = (H_{ads} - H_{cond})/R$$

despejando para obtener el valor de Q_{st} :

$$Q_{st} = m \times R$$

4) Se construye la gráfica Q_{st} vs. contenido de humedad; de ésta manera se evalúa el comportamiento energético del proceso de adsorción de humedad en los polvos, conforme se aumenta el contenido de humedad se requiere cierta cantidad de energía para adsorber o liberar las moléculas de agua.

Se calculó también el calor isostérico neto que se obtiene de la teoría B.E.T. el cual sirve para conocer la energía requerida para adsorber o liberar las moléculas de agua a nivel de monocapa.

1) Del valor de la constante C se puede obtener el calor neto de adsorción considerado constante a una temperatura dada, De acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_n = RT \ln C - \ln(b_1 a_2 / b_2 a_1)$$

Para propósito de cálculo, usualmente se supone que $b_1 a_2 / b_2 a_1 = K = 1$.
Lo cuál nos da:

$$Q_n = RT \ln C$$

ANEXOS

6. TÉCNICA DEL ANÁLISIS DE PROMEDIO POR NIVELES. (METODO TAGUCHI)

Una vez que se tienen registrados los datos experimentales de las características de calidad, para cada corrida experimental del arreglo ortogonal, se aplica el análisis de promedio por niveles:(19).

Cálculos:

1. Determinar la media para cada fila (corrida experimental), empleando la siguiente ecuación:

$$y_x = [D_1 + D_2 + \dots + D_n] / n$$

Después de calcular la respuesta media para cada fila, se debe adicionar una columna al arreglo ortogonal para registrar la media correspondiente con cada combinación de los niveles por factor.

2. Calcular el promedio y (respuesta media) para cada nivel de factor e interacción y desarrollar una tabla de respuestas promedio. Esto se hace agrupando las respuestas medias por cada nivel de factor para cada columna en el arreglo, es decir sumandolas, y dividiendolas por el número de respuestas. La diferencia absoluta o delta entre los dos resultados promedio (dos niveles) es el efecto del factor o interacción.

Para obtener la respuesta promedio de un factor A en su nivel 1, se suman las medias (y) donde se controló el nivel 1 del factor y se divide entre el número de respuestas.(en un $L_n(2^7)$ el número de las respuestas medias para cada nivel es de 4).

Entonces:
$$A_1 = [y_{n1} + y_{n1} + \dots + y_{n1w}] / w$$

Por lo tanto paracalcular el segundo nivel de A:

$$A_2 = [y_{n2} + y_{n2} + \dots + y_{n2w}] / w$$

Donde: A_1 y A_2 son las respuesta promedio para los niveles 1 y 2, respectivamente, del factor A; y_{n1} y y_{n2} , son las medias correspondientes a las corridas n donde el nivel 1 y 2 , respectivamente , se controlaron; w es el número de veces en que se presenta cada nivel por factor en el arreglo .

Para calcular el efecto del factor A se aplica:

$$\text{Efecto de A} = |A_1 - A_2|$$

ANEXOS

De forma similar se calculan las respuestas promedio por nivel del factor siguiente o interacción, y su efecto.

3. En base a la respuesta promedio para cada nivel de factor o interacción, se pueden construir los gráficos de respuesta promedio.

4. Se analizan el cuadro y los gráficos de respuestas promedio, con la finalidad de determinar aquellos factores que tienen un efecto fuerte sobre la característica de calidad de interés. Una aproximación sistemática y consistente es identificar el efecto más fuerte, y entonces el siguiente más grande, hasta el menor. Para observar un punto de quiebra lógico debemos comparar cada factor o interacción con el ulterior efecto más fuerte.

El punto exacto de quiebra entre los factores identificados como fuertes y aquellos de media o débil influencia se basa en la diferencia relativa desde un efecto a otro. Para comparar las diferencias relativas en la magnitud de los efectos, podemos comparar las diferencias relativas en las pendientes.

Cuando una interacción tiene un efecto fuerte o nos interesa conocer mejor su influencia, se realizan las matrices de Interacción. Para construir una matriz 2×2 de un $L_8(2^7)$ que comprenda las combinaciones de los valores de cada factor involucrado en la interacción, los cálculos se basan en los promedios de y para los correspondientes niveles de los factores en el arreglo ortogonal.

Interacción A X B:

$$\text{Punto 1} = A_1 \quad B_1 = [y_{11} + y_{11}] / 2$$

$$\text{Punto 2} = A_1 \quad B_2 = [y_{12} + y_{12}] / 2$$

$$\text{Punto 3} = A_2 \quad B_1 = [y_{21} + y_{21}] / 2$$

$$\text{Punto 4} = A_2 \quad B_2 = [y_{22} + y_{22}] / 2$$

Donde los subíndices 11, 12, 21, y 22 son las combinaciones de los niveles del factor A con el factor B. El denominador 2 indica que se presentan dos veces cada combinación entre las corridas del arreglo.

5. Una vez recomendados los niveles para los factores e interacciones de interés, se realiza una estimación de la respuesta predicha basándose en los niveles seleccionados de los efectos fuertes. (Sólo los efectos fuertes se involucran en la ecuación de predicción).

ANEXOS

Los cálculos se basan en el valor del promedio total experimental y el efecto que cada uno de los niveles recomendados de los factores e interacciones fuertes tienen sobre el promedio total.

El promedio total se define como:

$$T = \sum_{i=1}^n y/n = [(y_1 + y_2 + \dots + y_n) / n]$$

Donde n es el número de corridas experimentales del arreglo ortogonal, y y la respuesta media de cada corrida.

Definiendo al promedio predicho como \bar{y} y se incorpora el efecto sobre el promedio total por cada uno de los factores e interacciones fuertes, la ecuación de predicción es:

$$\bar{y} = T + (A_x - T) + (B_z - T) + [(A_x B_z - T) - (A_x - T) - (B_z - T)] + \dots + (C_x - T) + (D_z - T).$$

En este ejemplo de la estructura que tiene una ecuación de predicción, a cada factor a su nivel x o z se le resta el promedio total. En el caso de involucrar una interacción fuerte, se debe restar la diferencia de cada factor con el promedio total, con la finalidad de no obtener un resultado sobreestimado.

6. Realizar un a corrida confirmatoria y comparar estos resultados con los predichos.

Si los resultados obtenidos en la comprobación están cercanos al valor predicho, el conjunto de valores recomendados puede implementarse. Si el resultado está en desacuerdo, se debe retomar a la fase de planeación y considerar las posibles causas.

La obtención de la contribución porcentual por factor e interacción se realizó mediante la aplicación del paquete Software de ANOVA (método Taguchi). Los resultados obtenidos de esta forma resultan más fácilmente seleccionables para la realización de las ecuaciones de predicción y la consecuente optimización de las variables del proceso.

ANEXOS

7. Memoria de calculo (ejemplo con la muestra de 14.5 ° Brix + 8 % de M.D. y 2 % de SGC.)

Propiedades de la materia prima (determinadas experimentalmente):

Densidad = 1090 Kg/m³
Tensión superficial = 5.35×10^{-11} N/m.
Viscosidad = 3.66×10^{-3} Pa.s.
Contenido de humedad = 79.69 %
Contenido de sólidos totales = 20.31 %
Contenido de sólidos solubles = 22.4 ° Brix.

1.- Cálculo de la capacidad calorífica del sólido y del alimento:

$$\begin{aligned} C_{pS} &= \text{Capacidad calorífica del sólido. \{Kcal/Kg sólido } ^\circ\text{C}\}. \\ &= 1.256X_S + 4.187X_L + 2.09X_G. \text{ (Charm,1986).} \end{aligned}$$

$$X_S = \text{Fracción de sólidos.} = 0.2031$$

$$X_L = \text{Fracción de agua líquida. (en } C_{pS}, X_L=0).$$

$$X_G = \text{Fracción de grasa. (en } C_{pS}, X_G=0).$$

$$C_{pS} = 0.0609 \text{ Kcal/Kg. sólido } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} C_{pL} &= \text{Capacidad calorífica del agua líquida \{Kcal/KgH}_2\text{O } ^\circ\text{C}\} \\ &= 0.9995 \text{ Kcal/KgH}_2\text{O } ^\circ\text{C, a } 25^\circ\text{C y 1 atm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{p \text{ alim}} &= \text{Capacidades caloríficas del alimento \{Kcal/KgH}_2\text{O } ^\circ\text{C}\} \\ &= 1.256X_S + 4.187X_L + 2.09X_G. \text{ (Charm,1986)} \end{aligned}$$

$$X_S = \text{Fracción de sólidos.} = 0.2031$$

$$X_L = \text{Fracción de agua líquida.} = 0.7969$$

$$X_G = \text{Fracción de grasa. (en } C_{p \text{ alim.}}, X_G=0)$$

$$C_{p \text{ alim}} = 0.8579 \text{ Kcal/Kg alim. } ^\circ\text{C.}$$

2.-Datos de las condiciones del secado:

$$T_{\text{ent.}} = 230^\circ\text{C.}$$

$$T_{\text{sal.}} = 120^\circ\text{C}$$

$$\% \text{ H.R. (ambiente)} = 42.5 \%$$

$$T_{\text{amb.}} = 31^\circ\text{C.}$$

$$T_{\text{alim.}} = 23^\circ\text{C.}$$

$$T.B.H. \text{ (a la salida del secador)} = 38.8^\circ\text{C}$$

ANEXOS

Velocidad del aire = 19.62 m/s.
Flujo volumetrico = $3.45 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$.
Masa de sólido seco = 0.7640 Kg.s.s./hr.

3.- Datos extraidos de carta psicrométrica (760 mmHg)

Volumén húmedo = $V_H = (22.4 + 273) + (1/29 + H_{a,1}/18) = 0.1211 \text{ m}^3/\text{Kg. a.h.}$
Humedad absoluta a la entrada = 0.0109. Kg. agua /Kg. a.s.
Humedad absoluta a la salida = 0.60 Kg. agua /kg.a.s.
Gasto de aire seco = $G_a = * \text{Vol. aire} / V_H = 1422.29 \text{ Kg a.s./hr}$
*Vol aire = (Velocidad del aire)(area de salida)(3600) = 156.09 m^3 aire húmedo/hr.
Area de salida = $2.21 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.
Gasto de aire seco suministrado por el barredor = 133.3054 Kg a.s./hr.

4.- Datos de humedades aplicando la ecuación de corrección a la presión de Cuautitlan Izcalli (lugar donde se desarrollo el trabajo $P=585 \text{ mmHg}$) por lo que hubo que corregir este valor mediante la utilización de la siguiente fórmula:

$$H_{a(B)} = H_{a(A)} + 0.622 P'_w (1/(P_T - P'_w) - 1/(760 - P'_w))$$

Humedad absoluta a la entrada = 0.0324 Kg. agua /kg.a.s.
Humedad absoluta a la salida = 0.0815 Kg. agua /kg.a.s.

5.- Cálculo del Balance de Energía:

Ecuación general: $Q = G_a (E_{a1} - E_{a2}) + M_s (E_{s1} - E_{s2})$.

E_{s1} = Entalpía del sólido a la entrada (Kcal/Kg sólido).

E_{s2} = Entalpía del sólido a la salida (Kcal/Kg sólido).

$$E_{s1,2} = (C_{ps} + X_{L1,2} C_{pL})(T_{a1,2} - T_0)$$

G_a = Flujo másico de aire de secado (Kg aire seco/hr).

E_{a1} = Entalpía del aire a la entrada (Kcal/Kg aire seco).

E_{a2} = Entalpía del aire a la salida (Kcal/Kg aire seco).

$$E_{a1,2} = C_s(T_{a1,2} - T_0) + \lambda_0 H_{a1,2}$$

Q = Calor transmitido durante el secado = 64,849.80 Kcal/hr.

ANEXOS

6.- Cálculo de la *eficiencia evaporativa*.

Ecuación: $\eta_{\text{evap}} = (T_1 - T_2 / T_1 - T_{\text{sat}})(100)$.

$T_1 = 230 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_2 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_{\text{sat}} = 38.8 \text{ }^\circ\text{C}$

$\eta_{\text{evap}} = 57.53 \text{ } \%$

7.- Cálculo de la *eficiencia térmica total*.

Ecuación: $\eta_T = (T_1 - T_2 / T_1 - T_0)(100)$.

$T_1 = 230 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_2 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_0 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$

$\eta_T = 55.27 \text{ } \%$

8.- Cálculo del costo /Kilogramo.

1.- *Potencia requerida de atomización* :

Ecuación: $P_{\text{atm}} = (1.02 \cdot 10^{-8}) \times (w) \times (N \times D)^2$.

$P_{\text{atm}} = \text{Potencia de atomización} = 0.11 \text{ Kw}$.

$W = \text{gasto de alimentación} = 3.76 \text{ Kg. alimentación /hr}$.

$N = \text{r.p.m. del disco. (24, 000 rpm)}$

$D = \text{Diámetro del disco} = 0.12 \text{ m}$

2.- *Producción* :

Ecuación: $P = Q \times []$

$Q = \text{gasto de alimentación} = 4.19 \text{ Lt/hr}$.

$[] = \text{porcentaje en peso} = 21.34 \text{ } \%$

$P = \text{producción} = 70.09 \text{ grs-lt/hr}$.

ANEXOS

3.- Costo /kilogramo :

Ecuación : $\text{costo / kilogramo} = (1 / P) \times Kw \times \$$

$1/P = 0.0143 \text{ (grs.-lt/hr)}^{-1}$

$Kw = 9.9367 \text{ Kw empleados.}$

$\$ = 0.80 \text{ centavos (Kw/lr).}$

$\text{Costo kilogramo} = 0.11 + \text{costo de MD} + \text{costo de SGC.}$

$\text{Costo de MD.} = 4.50$

$\text{Costo de SGC.} = 2.45$

$\text{Costo/kilogramo total} = 7.06 \text{ pesos /Kilogramo}$

9.- Resultados de las características de calidad (metodología Taguchi).

Los resultados de solubilidad (%) presentados aquí, corresponden al arreglo ortogonal $L_8(2^7)$ para el extracto de yuca líquido de 14.5 ° Brix. A partir de este análisis y en conjunción con el de las otras características de calidad, se seleccionarán los niveles óptimos de las variables involucradas para el extracto.

Cuadro general para el análisis de niveles promedio para % de solubilidad. Extracto líquido de 14.5 ° Brix.

Variables		Niveles	
		N ₁	N ₂
A	T.ent.	220° C	230° C
B	T.sal.	110° C	120° C
C	%MD.	8	10
D	%SGC.	1	2

Arreglo ortogonal $L_8(2^7)$. Extracto de yuca (14.5° Brix).

corrida	A	B	AXB	C	AXC	AXD	D	respuesta
1	1	1	1	1	1	1	1	y1 = 99.80 %
2	1	1	1	2	2	2	2	y2 = 99.80 %
3	1	2	2	1	1	2	2	y3 = 99.90 %
4	1	2	2	2	2	1	1	y4 = 99.80 %
5	2	1	2	1	2	2	1	y5 = 99.80 %
6	2	1	2	2	1	1	2	y6 = 99.80 %
7	2	2	1	1	2	1	2	y7 = 99.80 %
8	2	2	1	2	1	2	1	y8 = 99.90 %

Cálculos:

- Determinar la media para cada fila (corrida experimental), empleando la siguiente ecuación:

$$y_x = [D_1 + D_2 + \dots + D_n] / n$$

(y1,y2,...y8 ver cuadro anterior)

ANEXOS

Después de calcular la respuesta media para cada fila, se debe adicionar una columna al arreglo ortogonal para registrar la media correspondiente con cada combinación de los niveles por factor.

$$Y \text{ promedio} = (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8)/8 = \\ = 99.63 \% \text{ solubilidad.}$$

2. Calcular el promedio y (respuesta media) para cada nivel de factor e interacción y desarrollar una tabla de respuestas promedio. Esto se hace agrupando las respuestas medias por cada nivel de factor para cada columna en el arreglo, es decir sumandolas, y dividiendolas por el número de respuestas. La diferencia absoluta o delta entre los dos resultados promedio (dos niveles) es el efecto del factor o interacción.

Para obtener la respuesta promedio de un factor A en su nivel 1, se suman las medias (y) donde se controló el nivel 1 del factor y se divide entre el número de respuestas. (en un $L_8(2^7)$ el número de las respuestas medias para cada nivel es de 4).

$$\text{Entonces: } A_1 = [y_{n1} + y_{n1} + \dots + y_{n1w}] / w$$

$$\text{Factor A} = A_1 = (99.80 + 99.80 + 99.90 + 99.80)/4 = 99.825 \%$$

Por lo tanto para calcular el segundo nivel de A:

$$A_2 = [y_{n2} + y_{n2} + \dots + y_{n2w}] / w$$

$$\text{Factor A} = A_2 = (99.80 + 99.80 + 99.80 + 99.90)/4 = 99.825 \%$$

Donde: A_1 y A_2 son las respuesta promedio para los niveles 1 y 2, respectivamente, del factor A; y_{n1} y y_{n2} , son las medias correspondientes a las corridas n donde el nivel 1 y 2, respectivamente, se controlaron; w es el número de veces en que se presenta cada nivel por factor en el arreglo.

Para calcular el efecto del factor A se aplica:

$$\text{Efecto de A} = |A_1 - A_2|$$

$$\text{Efecto de A} = 99.825 - 99.825 = 0$$

De forma similar se calculan las respuestas promedio por nivel del factor siguiente o interacción, y su efecto.

ANEXOS

Tabla de resultados para % de solubilidad (polvo del extracto líquido de 14.5 ° Brix)

niveles	A	B	AXB	C	AXC	D	AXD
1	99.825	99.80	99.825	99.825	99.85	99.80	99.825
2	99.825	99.85	99.825	99.825	99.80	99.85	99.825
Efecto	0	0.05	0	0	0.05	0.05	0

3. En base a la respuesta promedio para cada nivel de factor o interacción, se pueden construir los gráficos de respuesta promedio.

4. Se analizan el cuadro y los gráficos de respuestas promedio, con la finalidad de determinar aquellos factores que tienen un efecto fuerte sobre la característica de calidad de interés. Una aproximación sistemática y consistente es identificar el efecto más fuerte, y entonces el siguiente más grande, hasta el menor. Para observar un punto de quiebra lógico debemos comparar cada factor o interacción con el ulterior efecto más fuerte.

El punto exacto de quiebra entre los factores identificados como fuertes y aquellos de media o débil influencia se basa en la diferencia relativa desde un efecto a otro. Para comparar las diferencias relativas en la magnitud de los efectos, podemos comparar las diferencias relativas en las pendientes.

Cuando una interacción tiene un efecto fuerte o nos interesa conocer mejor su influencia, se realizan las matrices de Interacción. Para construir una matriz 2x2 de un $L_8(2^7)$ que comprenda las combinaciones de los valores de cada factor involucrado en la interacción, los cálculos se basan en los promedios de y para los correspondientes niveles de los factores en el arreglo ortogonal.

Interacción A X B:

$$\text{Punto 1} = A_1 B_1 = [y_{11} + y_{11}] / 2 = (99.80 + 99.80) / 2 = 99.80 \%$$

$$\text{Punto 2} = A_1 B_2 = [y_{12} + y_{12}] / 2 = (99.90 + 99.80) / 2 = 99.85 \%$$

$$\text{Punto 3} = A_2 B_1 = [y_{21} + y_{21}] / 2 = (99.80 + 99.80) / 2 = 99.80 \%$$

$$\text{Punto 4} = A_2 B_2 = [y_{22} + y_{22}] / 2 = (99.80 + 99.90) / 2 = 99.85 \%$$

Donde los subíndices 11, 12, 21, y 22 son las combinaciones de los niveles del factor A con el factor B. El denominador 2 indica que se presentan dos veces cada combinación entre las corridas del arreglo.

5. Una vez recomendados los niveles para los factores e interacciones de interés, se realiza una estimación de la respuesta predicha basándose en los niveles seleccionados de los efectos fuertes. (Sólo los efectos fuertes se involucran en la ecuación de predicción).

ANEXOS

Los cálculos se basan en el valor del promedio total experimental y el efecto que cada uno de los niveles recomendados de los factores e interacciones fuertes tienen sobre el promedio total.

El promedio total se define como:

$$T = \sum_{i=1}^n y/n = [(y_1 + y_2 + \dots + y_n) / n]$$

$$T = 99.63 \% \text{ solubilidad.}$$

Donde n es el número de corridas experimentales del arreglo ortogonal, y y la respuesta media de cada corrida.

Definiendo al promedio predicho como ω y se incorpora el efecto sobre el promedio total por cada uno de los factores e interacciones fuertes, la ecuación de predicción es:

$$\omega = T + (A_x - T) + (B_z - T) + [(A_x B_z - T) - (A_x - T) - (B_z - T)] + \dots \\ + (C_x - T) + (D_z - T).$$

En este ejemplo de la estructura que tiene una ecuación de predicción, a cada factor a su nivel x o z se le resta el promedio total. En el caso de involucrar una interacción fuerte, se debe restar la diferencia de cada factor con el promedio total, con la finalidad de no obtener un resultado sobreestimado.

Para el ejemplo de % solubilidad (14.5 °Brix):

$$\omega = T + (A_2 - T) + (B_2 - T) + [(A_2 C_2 - T) - (A_2 - T) - (C_2 - T)] + (D_2 - T).$$

Agrupando por términos semejantes, se obtiene:

$$\omega = A_2 C_2 - A_2 - C_2 + B_2 + D_2.$$

sustituyendo los valores promedio obtenidos por los cálculos, se obtiene el valor predicho para % de solubilidad:

$$\omega = 99.85 - 99.825 - 99.825 + 99.85 + 99.85$$

$$\omega = 99.90 \% \text{ solubilidad.}$$

ANEXOS

6. Realizar una corrida confirmatoria y comparar estos resultados con los predichos.

Para el ejemplo:

valor de corrida confirmatoria (promedio) = 99.80 % solubilidad.

$\bar{\mu}$ = 99.90 % solubilidad.

% de error = 0.1 %

Si los resultados obtenidos en la comprobación están cercanos al valor predicho, el conjunto de valores recomendados puede implementarse. Si el resultado está en desacuerdo, se debe retornar a la fase de planeación y considerar las posibles causas.

La obtención de la contribución porcentual por factor e interacción se realizó mediante la aplicación del paquete Software de ANOVA (Análisis experimental basado en el método Taguchi). Los resultados obtenidos de esta forma resultan más fácilmente seleccionables para la realización de las ecuaciones de predicción y la consecuente optimización de las variables del proceso

**Tabla obtenida del software:
% Solubilidad (Extracto de 14.5°Brix).**

Col	Factor	Nivel 1	Nivel 2	Porcentaje*
1	T.ent	99.825	99.825	0.00
2	T.sal	99.800	99.850	33.33
3	T.ent X T.sal.	99.825	99.825	0.00
4	% M.D.	99.825	99.825	0.00
5	T.ent X % M.D.	99.850	99.800	33.33
6	% S.G.C.	99.825	99.825	0.00
7	T.ent X % S.G.C.	99.800	99.850	33.33

* Corresponde al % de contribución del factor o interacción, con este valor se realizaron los gráficos presentados en el capítulo III.

ANEXOS

8. NOMENCLATURA

$P_A = 760$ mmHg

P'_w = Presión de vapor de agua en la temperatura de bulbo húmedo. (mmHg)

C_p = Calor específico del vapor a presión constante. (Kcal/Kg°C)

λ = Calor latente de vaporización a temperatura de bulbo húmedo (Kcal/Kg°C)

ΔT = Diferencia de temperatura entre la superficie y el aire (p.e. TBH y TBS) (°)

D = Diámetro de la gota. (m)

ρ_s = Densidad del medio de secado. (Kg/m³)

μ_s = Viscosidad del medio de secado. (Pa.seg)

C_p = Capacidad Calorífica (a presión constante del medio de secado). (Kcal/Kg°C)

K_d = Conductividad Térmica promedio de la película gaseosa rodeando una gota en evaporación. (W/m°C)

h_c = Coeficiente de Transferencia de Calor Convectivo. (Kcal/hm²°F)

K_m = Coeficiente de Transferencia de Masa. (W/m²°K)

D_v = Coeficiente de Difusión. (m²/seg)

Q = Calor transmitido durante el secado. (Kcal/hr).

G_a = Flujo másico de aire de secado (Kg aire seco/hr).

E_{a1} = Entalpía del aire a la entrada (Kcal/Kg aire seco).

E_{a2} = Entalpía del aire a la salida (Kcal/Kg aire seco).

$E_{a1,2} = C_s(T_{a1,2} - T_0) + \lambda_0 H_{a1,2}$.

C_s = Calor Húmedo (Kcal/Kg aire seco °C).

T_a = Temperatura del aire de secado. (°C).

T_0 = Temperatura de referencia (0 °C).

λ_0 = Calor latente de vaporización del agua a T_0 .
= 597.8 Kcal/Kg H₂O.

H_a = humedad absoluta del aire de secado (Kg H₂O/Kg aire seco).

M_s = Flujo másico de sólidos (Kg sólido/hr).

E_{s1} = Entalpía del sólido a la entrada (Kcal/Kg sólido).

E_{s2} = Entalpía del sólido a la salida (Kcal/Kg sólido).

$E_{s1,2} = (C_{pS} + X_{L1,2} C_{pL}) (T_{a1,2} - T_0)$.

C_{pS} = Capacidad calorífica del sólido. (Kcal/Kg sólido °C).
= 1.2.56 X_S + 4.187 X_L + 2.09 X_G . (Charm, 1986).

X_S = Fracción de sólidos.

X_L = Fracción de agua líquida. (en $C_{pS}, X_L=0$).

X_G = Fracción de grasa. (en $C_{pS}, X_G=0$).

C_{pL} = Capacidad calorífica del agua líquida (Kcal/KgH₂O °C)
= 0.9995 Kcal/KgH₂O °C, a 25 °C y 1 atm.

T_a = Temperatura del aire de secado. (°C).

T_0 = Temperatura de referencia (0 °C).

1 = Entrada, 2 = Salida.

y_x = Valor medio de los datos para cada corrida (X indica el # de corrida correspondiente).

D_{ii} = Dato experimental correspondiente a cada repetición (ii es el número de repeticiones realizadas).

ANEXOS

- P_{atm} = Potencia de atomización (Kwatt)
 w = Gasto de alimentación (Kg / seg)
 N = Velocidad de giro del atomizador (rpm)
 Dr = Diámetro del disco atomizador (m)
 P = Producción (Kg-Lts / hr)
 Q = Gasto de alimentación (lts / hr)
 $\{ \}$ = Concentración (% en peso)
costo / Kilogramo = El valor eléctrico requerido por kilogramo de producto. (\$ / Kg)
 $1 / Q$ = Inverso del gasto de alimentación (lts / hr)
 $1 / \{ \}$ = Inverso de la concentración (% en peso)
 Kw = Kilowatts de motores y resistencias electricas (Kwatt)
 $\$$ = \$ por Kwatt / hr proporcionado por CFE (\$ / (Kwatt / hr))
 Vel = Velocidad del aire (m / seg)
 $Area$ = Area de la tovera de salida ($2.21 \times 10^{-3} m^2$). (m^2)
 Vh = Volumen húmedo del aire (m^3 aire húmedo / Kg aire seco)
 T_{ent} = Temperatura de entrada del aire de secado ($^{\circ}C$)
 T_{sal} = Temperatura de salida del aire de secado ($^{\circ}C$)
 T_{sat} = Temperatura de saturación igual a temperatura de bulbo húmedo ($^{\circ}C$)
 T_{amb} = Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
% MD. = Adición de maltodextrinas (% en peso)
% SGC = Adición de spray gun tipo "c" (% en peso)
 G_L = Flujo másico del líquido (Kg/min)
 N' = Velocidad de rotación del disco atomizador. (r.p.m.)
 d = Diámetro del disco (m)
 n' = Número de paletas del disco atomizador.
 H' = Altura de la paleta (m).
 K = Constante en función del tamaño del secador.
= 2.71×10^6 . (para el secador empleado).

☐ BIBLIOGRAFIA ☐

- 1.- AGUERRE, R.J. , SUAREZ y P.E. VIOLLAZ . Calculation of variation of the heat of desorption with moisture content on basis of B.E.T. theory. *Journal of Food Technology* . Vol. 19. 1984 Pags: 325-331.
- 2.- AGUERRE, R.J. , SUAREZ y P.E. VIOLLAZ . Moisture desorption isotherms of rough rice. *Journal of Food Technology* . Vol 18. 1983 Pags 335-351
- 3.- ARANCIA S.A. de C.V. " Carbohidratos Especiales (Apoyo Tecnico)."
- 4.- AVILA R. M. I. Aplicación del Control Estadístico de Calidad en una Industria de Sabores para Alimentos. Tesis. Ingeniería en Alimentos .F.E.S.-C. UNAM. México 1995. 76 pp.
- 5.- BADUI, D. S. Química de los Alimentos . 2da. Edición. Ed. ALHAMBRA UNIVERSIDAD . México D.F. 1990.
- 6.- BARBOSA -CANOVAS , G.V. , R. RUFNER y M. PELEG. Microstructure of Selected Binary Food Powders Mixtures. *Journal of Food Science* 1985. Vol 50 , pags 473-477.
- 7.- CARERA R. P. Estudio del Transporte Simultáneo de Calor y Masa en el Secado por Aspersión Tesis. Ingeniería en Alimentos. F.E.S.-C. UNAM México 1994.
- 8.- CAURIE ,M. General Method to predicting water activity. *Journal of Food Technology* . 1986. Vol 21. pags : 221-228.
- 9.- CHIRIFE, J. , C. SUAREZ y H.A. IGLESIAS . Technical Note: The Calculation of heat of water sorption in food on the basis of B.E.T. theory. *Journal of Food Technology* . Vol 21. 1986. pags: 103-107.
- 10.- CLARK ,G.L. Enciclopedia de Química. Ed.. OMEGA S.A. Barcelona ,España 1961. 476 pp.
- 11.- COLLOIDES NATURELS INTERNATIONAL " Bulletin G 54/C ; (Spray Gum Tipe C)".
- 12.- CURRAN,C. y R.G. POULTER. Isohalic sorption isotherms .III. Application of a dried salted tropical fish (*Xenomugil Thoburni*). *Journal of Food Technology* . Vol 18. 1983. pags : 739 - 746.
- 13.- DUXBURY , DEAN D. . Foam Control is vital in Many Foods / Beverages .*Food Processing* . Noviembre 1986 . pags : 42-44.
- 14.- FINN N. , B. S. , Modern Spray Drying Plants and Techniques. A / S Niro Atomizer. Copenhagen Denmark . 1991.
- 15.- GARCÍA ; O. La Goma Arábica : una maravilla natural que nos beneficia a todos .*Industria Alimentaria*. 1987. pags : 4 - 13.
- 16.- GEANKLOPLIS , C. J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Ed. CONTINENTAL S.A. México. 1982. 759 pp.
- 17.- GEIL-HANSEN, F. y M. FLINK . Application of Microscopic Techniques to the Description of Structure of Dehydrated Food systems. *Journal of Food Science* . 1976. Vol. 41 pags : 483 - 489.
- 18.- GENICHI T. Introduction to Quality Engineering. Designing Quality into products and process. Ed. Asian Productivity Organization . Tokyo, Japan. 1986. 522 pp.

- 19.- GLEN S. P. *Taguchi Method, A Hands-On Approach*, Ed. ADDISON-WESLEY PUBLISHING Co. Inc. México 1993. 191 pp.
- 20.- GLUCKERT, F.A. *A Theoretical Correlation of Spray-Dryer Performance*. Journal of A. Y. Ch.E. September 1962. Vol 8 Num. 4 .pags :460 - 466.
- 21.- GLUCKERT y MARSHALL. *Centrifugal Disk Atomization*. Chemical Engineering Process. April 1952. Vol. 48.
- 22.- HELDMAN, D. R. y SINGH, R. P. *Food Process Engineering*. Second Edition. Ed. AVI Publishing Co. Inc. Westport Connecticut. 1981. pags : 284 - 309.
- 23.- HELDMAN J. " *Farmacopea Teoría y práctica* " Ed. CECSA México, 1980.
- 24.- IGLESIAS, H.A. , J.CHIRIFE y C.F. FONTAN. *Temperature Dependence of Water Sorption Isotherms of Some Foods*. Journal of Food Science . Vol. 51. 1986 pags : 551 - 553.
- 25.- INDUSTRIA RAGAR S.A. de C.V. " *Goma Arábica Modificada (Apoyo Tecnico)* "
- 26.- AL-KAHINI, H.A. y BAKRI H.H. " *Spray Drying of Roselle (Hibiscus sabdariffa L.) Extract* " Journal of Foods processing. Vol. 55 No. 4 1990.
- 27.- KAREL, M. " *Dehydration of foods , In physical Principles of Foods Preservation*. " Ed. Macel Beker Inc. New York 1975.
- 28.- KELLEY, S.G. y POST, F.J. *Técnicas de Microbiología*. Ed. STAR PUBLISHING Co. E.U.A. 1991.548 pp.
- 29.- KNEULE F. *El Secado*.Ed. URMO EDICIONES Bilbao , España. 1976. Tomo 1
- 30.- LABUZA , T.P. , A. KAAANANE y J.Y. CHEN . *Effect of temperature on moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods*. Journal of Food Science. Vol. 50. 1985 pags : 385 - 391.
- 31.- LOMAURO , C.J. , A.S. BAKSHI y T.P. LABUZA .*Molsture tranfer properties of dry and semimolst foods*. Journal of Food Science. Vol 50. 1985 pags : 397 - 400.
- 32.- LOMAURO , C.J. , A.S. BAKSHI . *Finite element analys of moisture diffusion In stored foods*. Journal of Food Science. Vol. 50 1985 pags : 392 - 396.
- 33.- MASTERS , K. *Spray Drying . An Introduction...*, Ed. G.G.L. London 1976.
- 34.- MARSHALL, W.R. y SELTZER , E. " *Principles of Spray Dryer . Part I. Fundamental of Spray Dryer Operatlon* " .Chem. Eng. Prog.Vol.46 No. 10. 1950. Pags: 501-508.
- 35.- MARSHALL, W.R. y SELTZER , E. " *Principles of Spray Dryer . Part II . Fundamental of Spray Dryer Desing* " . Chem. Eng. Prog. Vol.46.No,10. 1950. Pags: 575-581.
- 36.- MILLMAN , M.J. , A.i. LIAPIS y J.M. MARCHELLO. *Note on the econinlcs of batch freeze dryers*. Journal of Food Technology . Vol. 20. 1985 pags : 541 - 551.
- 37.- MOISCHIAR , S. y FARDIN, J.P. *Sorption propieties of raw hake muscle*. Journal of Food Technology . Vol. 21. 1986. pags : 95 - 102.

- 38.- NIEMBRO R. A.. *Arboles y Arbustos útiles de México. Naturales e Introducidos.*
Ed. LIMUSA - NORIEGA. México 1990. Universidad Autónoma de Chapingo. Dpto. de Bosques.
206 pp.
- 39.- NIRO ATOMIZER, "Instruction Manual for N.A. Spray Dryer Plant", Niro Type Production
Minor No. 092-0873-00.
- 40.- NIRO ATOMIZER, "Secado por Atomización", Niro Atomizer, Folleto B-Na483
- 41.- PERRY R.H. y CHILTON, C.H. "Biblioteca del Ingeniero Químico" Ed. McGRAW-HILL.
México 1989.
- 42.- PILOSOV, A. M.R., BOQUET, R. Y BARTOLOMAI, G.B., Kinetics of Water Uptake by
foods Powders. A Research Note. Journal of Food Science. Vol. 50. 1985 pags : 278 - 281.
- 43.- RICE J. "Yuca Plant Extract, Works as Natural Foaming / Whipping agent for Beverages"
Food Processing. Abril 1983. pag : 58.
- 44.- RIZVI, S.S.H. y RAO, M.A.. *Engineering Properties of Foods. Cap IV. Foods in Dehydration.*
Ed. Marcel - Becker Inc. New York. 1986. 398 pp.
- 45.- ROMO D. A. *Productos naturales de la flora mexicana.* Ed. LIMUSA . México 1985. 220 pp.
- 46.- ROSENBERG, M., KOPELMAN, I.J. y TALMON, Y. A Scanning Electron Microscopy Study
of Microencapsulation. Journal of Food Science. 1985. Vol. 50. pags : 139 - 144.
- 47.- SCHWARTZ, M., GASQUE, F., MONTESINOS, M. y LAFUENTE., B. *Secado por atomización
de la horchata de chufas (Cyperus esculentus, L.). Efecto del proceso sobre la calidad del
Producto* Revista Agroquímica Tecnol. Aliment. Vol. 26. Num. 1. 1986 pags : 81 - 89.
- 48.- SOPADE, P.A. y AJISEGIRI, E.S. . Moisture sorption isotherms of Maize and Sorghum.
Journal of Food Process Engineering. Vol. 17. 1994. pags : 36 - 56.
- 49.- TECANTE C. A. *Operaciones Unitarias Alimentarias.* UNAM, Facultad de Química. México
D.F. 1992. 27 pp.
- 50.- TEIXEIRA, A A. y SHOEMAKER, C. F. *Computed Food Processing Operations.* Ed. AVI
Pu.Co.Inc. N.Y. 1988. 308 PP.
- 51.- THUESEN, H.G., FABRYENKY, W.J y THUENSEN, C.I. *Economía del proyecto en
Ingeniería.* Ed. PRENTICE / HALL INTERNATIONAL. Madrid, España. 1974. 489 pp.
- 52.- TOLEDO R. "Fundamentals of Food Process Engineering" Second Edition.
Ed. VAN NOSTRAND REINHOLD., N.Y. 1991. 602 pp.
- 53.- VALENZUELA, O. S. *Diseño de un Secador por Aspersión para Jugos. Tesis Ingeniería en
Alimentos.* F.E.S. -C. UNAM. México. 1987.
- 54.- VAN, W.B., COPLEY, M.J. y MORGAN, A.I. *Food Dehydration. Second Edition*
Ed. The AVI PUBLISHING Co. Inc. England. 1973. 529 pp.
- 55.- VAUGHAM, J.G. *Food Microscopy. Food Science and Technology, A series of Monographs.*
Ed. Academic Press. London. 1979.
- 56.- WASTON, E.L. Y HARPER, J. J.. *Elements of Foods Engineering.* Second Edition.
Ed. AVI Pt. Co. Inc. N.Y. 1988. 308 pp.

- 57.- WISTREICH, G.A. y LECITMAN, M.D.. **Prácticas de Laboratorio en Microbiología** .
Segunda Edición. Ed. LIMUSA México. 1978. 252 pp.
- 58.- ZILBERBOIM, R., KOPELMAN, I.J y TALMON, Y.. **Microencapsulation by a Dehydrating Liquid : Retention of Paprika Oleoresin and Aromatic Esters**. *Journal of Food Science* 1986. Vol. 51. No. 5 pags : 1301 - 1306.
- 59.- KENNETH H. **Official methods of Analysis of A.O.A.C.** Ed.A.O.A.C. 15 edición.
Arlington, Virginia. Vol.2. 1990.
- 60.- FANGAUF, R. y WICK, H.J. **Huevos: Planificación Comercial...** Ed. ACRIBIA. Zaragoza.
Trad.por. J.R. Muñoz de Arenillas.1968 183 pp.
- 61.- ZAMBRANO, Z. Ma. **Programa de capacitación análisis fisicoquímicos de Leche en polvo**.
LICONSA. México. 1991.
- 62.- ZAMBRANO.Z. Ma. **Evaluación de parámetros termodinámicos en productos biológicos**.
Información tecnológica. Vol. 5. No.1. 1994. I.P.N. Dpto. I.B.Q.,E.N.C.B. pags:57 - 62.