

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE SECADO PARA DESECHOS
PROCESADOS DE LA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE BEBIDAS A
BASE DE MALTA DE CEBADA**

Proyecto Final de Graduación sometido a consideración de la Escuela de
Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de licenciatura en
Ingeniería Química

DANIA JAZMÍN CISNEROS ARIAS

CUIDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO
SAN JOSÉ, COSTA RICA

2019

TRIBUNAL EXAMINADOR

Proyecto de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

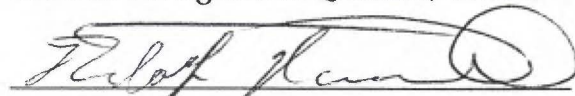
Sustentante: Dania Jazmín Cisneros Arias

Aprobado por:



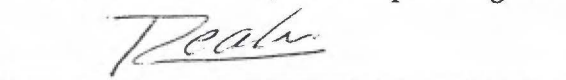
Ing. Esteban Durán Herrera, Ph.D.
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Presidente del Tribunal



Ing. Rodolfo Hernández Chaverri, M.Eng.
Cátedra Ciencias Químicas para Ingenierías, UNED.

Director del proyecto

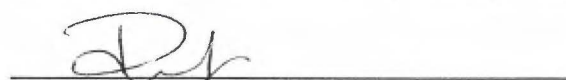


Ing. René Mora Casal, Ph.D.
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Miembro Lector

Ing. Sol de María Jiménez González, MAP
Cátedra Ciencias Químicas para Ingenierías, UNED.

Miembro Lector



Ing. Dianella Garro Espinoza
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Miembro Lector Invitado

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

2019

“El que sostiene el universo es el mismo que sostiene mi vida”

Anónimo (2015)

DEDICATORIA

A mis padres Runy y Gerardo, por su apoyo incondicional, comprensión, motivación, consejos y por creer siempre en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar al final, mostrarme la grandeza de su amor, compañía y enseñarme el camino siempre.

A mis padres Runy Arias y Gerardo Cisneros, mis hermanos Wendy, Erick y Cristofer por darme un apoyo incondicional, más allá de lo que pude entender.

A Juan Diego, hizo mi camino más feliz, por ayudarme cuando ya no podía más, por exigirme y motivarme a dar siempre a lo mejor de mí.

A mi director Rodolfo Hernández, por su paciencia, esfuerzo, dedicación y por guiarme en este proceso.

Al personal del CITA y del Laboratorio de Análisis Químico de Alimentos, por su amabilidad y disposición siempre a colaborar para que este proyecto se realizara de la mejor manera.

A don Julio Mata, por sus valiosos consejos y su tiempo.

A los profesores René Mora, Sol de María Jiménez, Manuel Molina y Randall Ramírez por su tiempo y por ser una guía.

A Karina que me acompañó y apoyó, desde el primer momento. A mi amiga Clarcy que siempre estuvo para escucharme y aconsejarme. A Xime, ella sabe por qué.

A mis amigas Karina, Clarcy, Ximena, Gloria, Susana, Gaby, Mónica y Melissa que hicieron de la Universidad un lugar lleno de vivencias, aventuras, compartimos trasnochadas y sufrimiento, sin ellas la Universidad no hubiese sido igual.

RESUMEN

En el presente trabajo se planteó el diseño de un secador para el residuo valorizable llamado grano gastado de cebada (BSG por sus siglas en inglés). El proyecto se llevó a cabo para la micro cervecería Dirιά, empresa que facilitó el grano con que se realizaron las pruebas. Se trabajó un diseño factorial 2^3 , con el que se estudiaron los factores de espesor del lecho de material a secar, velocidad y temperatura del aire de secado; este ensayo tuvo lugar en el secador piloto del Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CITA) de la Universidad de Costa Rica. Por su parte el análisis de extracción de agua realizado de manera manual y mecánica (prensa hidráulica), así como la determinación sobre el porcentaje de humedad en todas las muestras se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico de Alimentos de la escuela de Tecnología de Alimentos en la Universidad de Costa Rica, finalmente el desarrollo del modelo de absorción de agua, que sufre el grano posterior al proceso de secado, se efectuó en el Laboratorio de Biomásas de la Escuela de Química en la Universidad de Costa Rica.

Como primer paso se determinó el porcentaje de humedad inicial en las muestras proporcionadas de BSG, este proceso se realizó en una estufa de secado para la determinación de humedad, esto con el fin de conocer la cantidad de agua total existente en los granos. El análisis de extracción de líquido realizado mediante el uso de la prensa hidráulica, para cargas entre 200 lb y 1800 lb, y una carga manual de 110 lb, dio como resultado que una carga de 800 lb fue la idónea para prensar las muestras que se utilizaron en las secciones posteriores de secado. Con el fin de comparar la influencia que tuvo el pretratamiento de presando en la etapa de secado, se determinó la humedad remanente al material comprimido (de manera

manual y a 800 lb) de BSG. Posteriormente se sometieron los granos al secado térmico en un secador de circulación de aire caliente a través del sólido, para lo cual se realizaron dos diseños factoriales 2^3 a las muestras prensadas con las cargas antes mencionadas (manual y de 800 lb) y así poder comparar, se tomaron como variables experimentales el espesor de la torta en las bandejas, la temperatura y velocidad del aire de entrada, teniendo como variable de respuesta el tiempo de secado hasta llegar a una humedad aproximada del 7 % en base húmeda.

Este ensayo experimental arrojó como condiciones favorables para el secado, un prensado mecánico como tratamiento previo a una carga de 800 lb, espesor del lecho de 0.03 m, una velocidad de aire de 1.4 m/s y una temperatura del aire de 60 °C.

Consecutivamente al secado se desarrolló un modelo de absorción de agua, el cual proyectó que, si se dejara el grano expuesto a condiciones ambientales durante una semana en Santa Bárbara de Heredia se obtendría un aumento de 7 % a 17.5 % en el contenido de humedad del material seco.

Finalmente se realizó el dimensionamiento de un secador cuya cámara de secado tuvo valores de 0.605 m de ancho x 1.070 m de largo. La altura de dicha cámara alcanzó los 1.26 m, en el interior de la misma se distribuyó 28 bandejas divididas en dos columnas de 14. Las resistencias sumaron 22.6 kW en total, mientras que la potencia del ventilador fue de 0.307 kW. Todo este sistema dio un tiempo total de secado de aproximadamente 6 h.

La inversión inicial para poner en marcha el secador, es de ₡ 13 687 900 con un costo eléctrico mensual de ₡ 229 310 para su funcionamiento. La adquisición de paneles solares es de ₡ 24 370 800, los cuales tendrían como función es ser una alternativa al consumo eléctrico que se adquiriría de la compañía eléctrica local.

ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL EXAMINADOR.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1) Antecedentes	1
1.2) Justificación.....	2
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO	7
2.1) Morfología del grano de cebada	7
2.2) Proceso de elaboración de la cerveza	8
2.2.1) Proceso general de malteado.....	8
2.2.2) Generación del grano gastado de cebada (BSG) y Mosto	12
2.3) Características del grano gastado de cebada	13
2.4) Subproductos obtenidos del grano gastado de cebada.....	14
2.5) Tipos de humedad presentes en los materiales	16
2.6) El secado, tipos y escogencia de secadores.	17
2.6.1) Fundamentos del Secado	17
2.6.2) Tipos de secadores en la industria.....	19
2.6.3) Consideraciones a tomar en cuenta para escoger un secador	22
2.7) Energías limpias para operaciones de secado y uso de residuos agroindustriales.....	29
2.7.1) Energías limpias utilizables en operaciones de secado.....	29
2.7.2) Aprovechamiento de los residuos agroindustriales.....	31
2.8) Curvas de secado.....	32
2.8.1) Cálculo del tiempo de secado en condiciones constantes.....	36
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	39

3.1) Diagnóstico de la empresa, obtención de la muestra	39
3.2) Determinación de la humedad	40
3.3) Pruebas de prensado	41
3.3.1) Presión de la carga aplicada	43
3.4) Diseño experimental para pruebas en el secador para determinar condiciones de secado	43
3.5) Curvas de secado para el BSG	46
3.6) Determinación del agua absorbida posterior al secado	47
3.7) Resumen de los equipos utilizados en el trabajo	48
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	51
4.1) Diagnóstico de la empresa Diriá y distribución de planta actual.....	51
4.2) Escogencia del secador a dimensionar	52
4.3) Influencia del uso de una prensa hidráulica en el porcentaje de humedad del BSG.....	53
4.4) Análisis de las condiciones de operación para el secador.....	58
4.4.1) Selección de la temperatura de operación para el secador	58
4.4.2) Secado de muestra prensada manualmente.....	58
4.4.3) Secado de muestra prensada mecánicamente (800 lb)	64
4.4.4) Comparación del secado realizado luego del prensado manual (110 lb) y mecánico (800 lb).	68
4.5) Absorción de agua en el BSG posterior al secado.....	70
4.5.1) Deducción del modelo de absorción de agua para el BSG.....	70
4.5.2) Ejemplo de aplicación del modelo de absorción de agua para el BSG...	72
CAPÍTULO 5. TIEMPO DE OPERACIÓN Y CAÍDAS DE PRESIÓN EN EL SISTEMA.....	75
5.1) Análisis de las curvas de secado y cálculo del tiempo total de secado para el BSG.....	75
5.2) Tiempo de operación del secador	79

5.3) Caídas de presión en el sistema de secado.....	81
5.4) Expansión térmica del material.....	87
CAPÍTULO 6. DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR Y DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO.....	89
6.1) Dimensionamiento del secador.....	89
6.2) Diagrama de flujo de proceso	95
CAPÍTULO 7. ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN	99
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
Conclusiones.....	103
Recomendaciones	105
CAPÍTULO 9. NOMENCLATURA.....	107
CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFÍA.....	111
CAPÍTULO 11. APÉNDICES	117
APÉNDICE A. DATOS EXPERIMENTALES	117
APÉNDICE B. DATOS INTERMEDIOS.....	134
APÉNDICE C. MUESTRA DE CÁLCULO	145
APÉNDICE D. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	159
CAPÍTULO 12. ANEXOS	163

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Lista de chequeo típica de características a tomar en cuenta para un proceso de secado.....	22
Cuadro 2.2. Criterios de clasificación de secadores.	24
Cuadro 2.3. Matriz de selección para secadores según el tipo de material a secar.	26
Cuadro 2.4. Clasificación de secadores comerciales para sólidos granulares, cristalinos o fibrosos.....	27
Cuadro 2.5. Energías limpias para operaciones de secado.....	29
Cuadro 3.1. Presión aplicada a las muestras de BSG según corresponda a la carga aplicada.....	43
Cuadro 3.2. Diseño factorial 2^3 realizado para la carga “Manual” de las corridas efectuadas en el secador del CITA.....	45
Cuadro 3.3. Diseño factorial 2^3 realizado para la carga de 800 lb de las corridas efectuadas en el secador del CITA.....	46
Cuadro 3.4. Equipos utilizados para la realización de proyecto.....	48
Cuadro 4.1. Porcentaje de humedad de la muestra original de BSG determinado en estufa de humedad Cole Palmer.....	54
Cuadro 4.2. Porcentaje de humedad de los diversos lotes analizados de BSG determinado en estufa de humedad Cole Palmer.....	55
Cuadro 4.3. Humedad y porcentaje de extracción de líquido en las muestras de BSG posterior al prensado.	57
Cuadro 4.4. Valores promedio para tiempos de respuesta en el secado del BSG realizado en el secador de la planta piloto del CITA.	69
Cuadro 4.5. Resultados de humedad en las muestras de BSG posterior a la absorción de agua durante una semana. Determinado en estufa de humedad.....	73

Cuadro 5.1. Tiempo de secado para el BSG, para las muestras que se secaron bajo condiciones de T , v y δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m, respectivamente, hasta llegar a un 7 % de humedad en base húmeda.....	78
Cuadro 5.2. Área total expuesta por las semillas de cebada.....	79
Cuadro 5.3. Coeficiente de transferencia de calor para el BSG.	79
Cuadro 5.4. Datos de calor necesario para llevar a cabo el secado.	80
Cuadro 5.5. Mejores conjuntos condiciones encontradas para funcionamiento del secador.....	81
Cuadro 5.6. Factor de corrección de la energía cinética, factor de fricción de Fanning y número de Reynolds.....	83
Cuadro 5.7. Caída de presión en el sistema y pérdidas totales de energía por fricción	85
Cuadro 5.8. Caída de presión total en el secador y potencia del ventilador	86
Cuadro 5.9. Expansión térmica lineal de la bandeja.....	87
Cuadro 7.1. Valores teóricos por concepto de montaje e instalación para poner en marcha el secador.....	99
Cuadro 7.2. Costos de inversión iniciales del sistema de secado.....	100
Cuadro 7.3. Costo eléctrico en colones para el funcionamiento del secador.	100
Cuadro 7.4. Estimación de paneles solares para la producción de energía	101
Cuadro 7.5. Comparación económica del uso de paneles solares vs electricidad de la CNFL.	101
Cuadro 11.1. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, sin tratamiento previo de prensado, lote I.....	117
Cuadro 11.2. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, sin tratamiento previo de prensado lote de trabajo para usar en el secador.....	117

Cuadro 11.3. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posteriormente de aplicar una carga manual de 110 lb.	117
Cuadro 11.4. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posteriormente de aplicar una carga mecánica de 800 lb.....	117
Cuadro 11.5. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga manual (110 lb).	118
Cuadro 11.6. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 200 lb utilizando una prensa hidráulica.	118
Cuadro 11.7. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 400 lb utilizando una prensa hidráulica.	118
Cuadro 11.8. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 600 lb utilizando una prensa hidráulica.	119
Cuadro 11.9. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 800 lb utilizando una prensa hidráulica.	119
Cuadro 11.10. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1000 lb utilizando una prensa hidráulica.	119
Cuadro 11.11. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1200 lb utilizando una prensa hidráulica.	119
Cuadro 11.12. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1400 lb utilizando una prensa hidráulica.	119
Cuadro 11.13. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1600 lb utilizando una prensa hidráulica.	120
Cuadro 11.14. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1800 lb utilizando una prensa hidráulica.	120

Cuadro 11.15. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 1 y 9 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).	120
Cuadro 11.16. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 2 y 10 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).	121
Cuadro 11.17. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 3 y 11 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).	121
Cuadro 11.18. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 4 y 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).	122
Cuadro 11.19. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 5 y 13 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).	123
Cuadro 11.20. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 6 y 14 (T, v, δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).	124
Cuadro 11.21. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 7 y 15 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.030 m).	124
Cuadro 11.22. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 8 y 16 (T, v, δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.030 m).	125

Cuadro 11.23. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 1 y 9 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).....	126
Cuadro 11.24. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 2 y 10 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).....	126
Cuadro 11.25. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 3 y 11 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).....	127
Cuadro 11.26. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 4 y 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).....	128
Cuadro 11.27. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 5 y 13 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).....	128
Cuadro 11.28. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 6 y 14 (T, v, δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).....	129
Cuadro 11.29. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 7 y 15 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.030 m).....	130
Cuadro 11.30. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 8 y 16 (T, v, δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.030 m).....	130

Cuadro 11.31. Datos de tiempo y porcentaje de humedad cercano a 7 %, para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual y mecánico.....	131
Cuadro 11.32. Datos de absorción de agua en el BSG posterior al secado, evaluado durante una semana bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra I..	132
Cuadro 11.33. Datos de absorción de agua en el BSG posterior al secado, evaluado durante una semana bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra II.	132
Cuadro 11.34. Datos de absorción de agua en el BSG posterior al secado, evaluado durante una semana bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra III.	133
Cuadro 11.35. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posterior a la exposición a condiciones ambientales durante una semana, muestra I.....	133
Cuadro 11.36. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posterior a la exposición a condiciones ambientales durante una semana muestra II.	133
Cuadro 11.37. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posterior a la exposición a condiciones ambientales durante una semana muestra III.	134
Cuadro 11.38. Dimensiones de granos de BSG utilizados para el estudio.....	134
Cuadro 11.39. Determinación de porcentaje de humedad de la cebada malteada, sin tratamiento previo de prensado (Lote I)	134
Cuadro 11.40. Determinación de porcentaje de humedad de la cebada malteada, sin tratamiento previo de prensado, para lote de trabajo utilizado en el secador..	135
Cuadro 11.41. Determinación de porcentaje de humedad de la cebada malteada posterior de ser aplicada una carga manual de 110 lb.	135

Cuadro 11.42. Determinación de porcentaje de humedad de la cebada malteada posterior de ser aplicada una carga mecánica de 800 lb.	135
Cuadro 11.43. Valores de extracción de líquido para una muestra de 600 g de BSG cuando se aplica una carga manual (110 lb) o mecánica (prensa hidráulica) según corresponda.	135
Cuadro 11.44. Coeficientes del modelo de absorción de agua del BSG, posterior al secado.	136
Cuadro 11.45. Determinación de porcentaje de humedad del BGS, posterior a la absorción de agua durante una semana, bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra I.	136
Cuadro 11.46. Determinación de porcentaje de humedad del BGS, posterior a la absorción de agua durante una semana, bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra II.	136
Cuadro 11.47. Determinación de porcentaje de humedad del BGS, posterior a la absorción de agua durante una semana, bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra III.	137
Cuadro 11.48. Humedad en base seca y base húmeda, para corrida 4 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.	137
Cuadro 11.49. Humedad en base seca y base húmeda, para corrida 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.	138
Cuadro 11.50. Ecuaciones de mejor ajuste, para las gráficas de humedad en base seca en función del tiempo, para corrida 4 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.	139
Cuadro 11.51. Ecuaciones de mejor ajuste, para las gráficas de humedad en base seca en función del tiempo, para corrida 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.	139

Cuadro 11.52. Derivada de la humedad en base seca en función del tiempo y velocidad de secado, para corrida 4 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.	139
Cuadro 11.53. Derivada de la humedad en base seca en función del tiempo y velocidad de secado, para corrida 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.	140
Cuadro 11.54. Tiempo de secado del BSG, para corrida 4 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.	141
Cuadro 11.55. Tiempo de secado del BSG, para corrida 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.	141
Cuadro 11.56. Datos determinados de manera teórica, a una temperatura de bulbo húmedo de 29.8 °C.	142
Cuadro 11.57. Datos determinados de manera teórica en tablas de aire seco a 60 °C y 1 atm de presión.	142
Cuadro 11.58. Densidad del gas de secado a 60 °C.	142
Cuadro 11.59. Dimensiones escogidas para el diseño del secador y condiciones del aire de secado.....	142
Cuadro 11.60. Datos de calor transferido desde el aire hacia el lecho de granos .	142
Cuadro 11.61. Datos requeridos para determinado el tiempo de secado estimado del BSG	143
Cuadro 11.62. Características del BSG que ingresa y sale del secador	143
Cuadro 11.63. Principales resultados de consumo energético para diferentes condiciones de secado.....	143
Cuadro 11.64. Determinación del diametro equivalente y velocidad del aire en las tuberías.....	143

Cuadro 11.65. Coeficientes de perdidas por expansión, contracción y accesorios.	144
Cuadro 11.66. Pérdida de energía por fricción de superficie ($4fLtDe$).	144
Cuadro 11.67. Datos para la determinación de caída de presión en el lecho.	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación esquemática del corte longitudinal del núcleo de cebada.	8
Figura 2.2. Comportamiento de los diferentes conceptos de humedad.	17
Figura 2.3. Curva típica de secado de materiales húmedos (a) y Curvas típicas de secado y de velocidad de secado (b).	33
Figura 2.4. Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre.	34
Figura 3.1. Apariencia del grano gastado de cebada al momento de la recepción de la materia prima.	40
Figura 3.2. Balanza analítica (a), estufa de humedad (b) utilizadas para la determinación de humedad de las muestras.	41
Figura 3.3. Prensa hidráulica Carver, ubicada en el Laboratorio de Análisis Químico de Alimentos de la escuela de Tecnología de Alimentos en la Universidad de Costa Rica.	42
Figura 3.4. Secador con circulación de aire a través del sólido, planta piloto del CITA, Universidad de Costa Rica.	44
Figura 3.5. Metodología seguida en el el tratamiento y evaluación de las muestras	49
Figura 4.1. Distribución de planta actual en micro cervecería Dirriá	52
Figura 4.2. Porcentaje de líquido removido al BSG, prensando con carga manual (110 lb) y carga mecánica utilizando una prensa hidráulica (200 lb-1800 lb)	56
Figura 4.3. Análisis de medias para los intervalos de líquido removido vs carga aplicada al BSG.	56

Figura 4.4. Gráfico de normalidad para el secado del BSG realizado posterior al prensado manual.....	59
Figura 4.5. Gráfico de residuos vs valores ajustados para el secado del BSG realizado posterior al prensado manual.....	60
Figura 4.6. Gráfica de Residuos vs Número de corrida para el secado del BSG realizado posterior al prensado manual.....	61
Figura 4.7. Cuadro de Pareto de los efectos estandarizados, para resultados de secado de BSG posterior al prensado manual.....	62
Figura 4.8. Gráfico de efectos principales para resultados de secado de BSG posterior al prensado manual.....	62
Figura 4.9. Grafica de efecto en la interacción del espesor en la velocidad de secador para resultados de secado de BSG posterior al prensado manual.	63
Figura 4.10. Gráfica de cubo, para resultados de secado de BSG posterior al prensado manual.....	64
Figura 4.11. Gráfico de normalidad para el secado del BSG realizado posterior al prensado mecánico (800 lb).	65
Figura 4.12. Gráfico de residuos vs valores ajustados para el secado del BSG realizado posterior al prensado mecánico (800 lb).	65
Figura 4.13. Gráfica de Residuos vs Número de corrida para el secado del BSG realizado posterior al prensado mecánico.....	66
Figura 4.14. Cuadro de Pareto de los efectos estandarizados, para resultados de secado de BSG posterior al prensado mecánico.	67
Figura 4.15. Gráfico de efectos principales para resultados de secado de BSG posterior al prensado mecánico.	67
Figura 4.16. Gráfica de cubo, para resultados de secado de BSG posterior al prensado mecánico.....	68

Figura 4.17. Curva de absorción de agua para muestras secas bajo parámetros de: Prensado mecánico, espesor de muestra: 0.030 m, velocidad de aire: 1.4 m/s, temperatura de aire: 60 °C.....	71
Figura 5.1. Comportamiento de la fracción de humedad en base seca del BSG contra el tiempo, para la corrida 4 (•) y corrida 12 (*) (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas a una carga de 800 lb.	76
Figura 5.2. Curva de secado; comportamiento de la rapidez de secado del BSG contra la humedad en base seca, para la corrida 4 (•) y corrida 12 (*) (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas a una carga de 800 lb.....	76
Figura 6.1. Vista frontal del secador y sus dimensiones	90
Figura 6.2. Vista lateral izquierda del secador y sus dimensiones	92
Figura 6.3. Vista lateral derecha del secador y sus dimensiones	94
Figura 6.4. Vista superior del secador y sus dimensiones	94
Figura 6.5. Detalle de las bandejas del secador y sus dimensiones	95
Figura 6.6. Distribución de planta incluyendo el sistema de secado en micro cervecería Diriá.....	96
Figura 6.7. Vista previa del diagrama de flujo de proceso del sistema de secado propuesto para la micro cervecería Diriá.....	97
Figura 12.1. Cotización del secador por la empresa.....	163
Figura 12.2. Cotización de la prensa hidráulica.	165
Figura 12.3. Cotización de las bandejas para el secador por parte de la empresa.	167
Figura 12.4. Condiciones meteorológicas para Barva de Heredia, en la estación Santa Lucía.	168

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta los antecedentes y justificación del proyecto. Se pretende dar a conocer la problemática a resolver y se plantean los objetivos a desarrollar.

1.1) Antecedentes

Actualmente las industrias tienden a aprovechar los residuos valorizables generados en su proceso, ya que esto toma relevancia desde un punto de vista ambiental y económico. En la producción de cerveza a base de cebada malteada se generan desechos como el grano gastado de cebada (BSG, por sus siglas en inglés) y recubrimientos de la semilla pertenecientes al grano, los cuales para el año 2011 en el continente americano representaron una cantidad de 255 000 ton/año (Petruccioli, Raviv, Di Silvestro y Dine, 2011).

La micro cervecería Dirιά es una empresa que se enfrentan a la problemática de tratar los desechos de su proceso de manufactura. Esta empresa inicia como un proyecto familiar en el 2016 en el cual se da una mezcla interdisciplinaria de profesionales en química, diseño gráfico y administración de empresas. Lo anterior hace que Dirιά posea un portafolio variado de servicios en oferta ya que no solo se enfoca en la comercialización de la cerveza de la “casa” con su propia marca, si no, que ofrecen el desarrollo de cervezas artesanales personalizadas y el apoyo en temas de mercadeo y publicidad a los negocios que adquieren sus productos, de manera que estos puedan colocarlos exitosamente en sus mercados de interés (Arguedas, 2017).

La planta de producción se encuentra ubicada en Santa Bárbara de Heredia y su línea de producción se centraliza en desarrollar bebidas a base de malta de cebada, siendo su principal actividad la elaboración de cervezas artesanales de calidad premium. El principal residuo que se genera son los ya mencionados granos

gastados de cebada que se obtienen de la extracción de la malta para la obtención del azúcar fermentable, actualmente se generan alrededor de 500 kg mensuales del BSG y la empresa busca soluciones para el aprovechamiento de estos residuos, entre las que se encuentran generar compost, desarrollo de galletas para mascotas o alimento para ganado. No obstante, si los granos no se utilizan rápidamente deben desecharse como desecho ordinario de tipo orgánico, esto debido a que en el proceso la cebada se sumerge en agua y se calienta a una determinada temperatura por un tiempo definido, con el fin de lograr una extracción de los componentes de interés (azúcares reductores); lo que genera que los granos cuando se retiran de la mezcla heterogénea posean un exceso de líquido y azúcares en su matriz. Luego de 24 h se percibe que inicia un proceso de descomposición (formación de un olor característico a alcohol) perdiendo valor nutricional como subproducto aprovechable, generando también fuertes olores, atracción de plagas y otros animales. Diríá actualmente desecha este residuo como basura, de manera semanal, la cual recolecta el camión municipal, en ocasiones y por interés de algunos ganaderos/agricultores de la zona el BSG les es regalado para alimentar animales, por lo que la disposición de estos residuos no representa un costo para la empresa, sin embargo, pierde un valioso subproducto.

Establecido lo anterior nace la necesidad de establecer un proceso donde se puedan valorizar estos residuos y conservar un mayor tiempo, en especial cuando se estima alcanzar una producción de 127 kg por día de residuos (Arguedas, 2017).

1.2) Justificación

El manejo de los residuos se ha convertido en un objetivo de la empresa, por lo cual se ha dado a la tarea de buscar soluciones para aumentar la vida útil del BSG. Diríá presenta interés en utilizar dicho residuo principalmente como aditivo para la alimentación de ganado o como base para el desarrollo de formulaciones para

mascotas con miras en diversificar, creando una subdivisión de la empresa que se dedique a la elaboración de este tipo de productos (Arguedas, 2017).

Gallardo (2012), indica que este tipo de desechos (BSG) de manera general se caracteriza por poseer un buen valor energético y un contenido de proteínas alto (más del 20% de la proteína bruta), sin embargo posee alrededor de un 75 % de humedad lo que se disminuye su valor nutricional. Debido a todo lo anterior y como ya se mencionó se establece la necesidad de secar este residuo y así alargar su vida útil con el objetivo de utilizarlo como materia prima en la elaboración de un nuevo producto. De lo anterior surge el requerimiento de diseñar y construir un secador que permita la conservación de los residuos de cerveza en la Cervecería Diría. Este secador debe llevar la humedad inicial del residuo (74.8 % para el residuo producido en Diría) a una humedad inferior al 10.0 % por especificaciones de la empresa.

Guerra (2012) estudió el efecto de tres niveles de porcentajes de humedad 8 %, 12 % y 14 % sobre la estabilidad durante el almacenamiento del grano gastado de cebada utilizado como concentrado. Los granos almacenados a estos porcentajes de humedad fueron sometidos a pruebas de granulometría, análisis químico de actividad de agua (a_w), valor de TBA (ácido tiobarbitúrico, índice de rancidez) y análisis microbiológicos de mohos y levaduras. Los resultados del estudio arrojaron que a estos valores de humedad los granos cumplieron con los parámetros de calidad de los alimentos balanceados.

Así, para la micro cervecería se puede pensar inicialmente en un proceso de prensado que elimine de manera mecánica una cantidad previa de agua del subproducto, un secado térmico mediante un secador que trabaje en la medida de lo posible con energías renovables y finalmente un adecuado almacenamiento del grano que impida al mismo absorber agua nuevamente.

El porcentaje de humedad se ve ligado con un parámetro muy utilizado en la industria alimenticia llamado actividad química del agua (a_w), que establece el grado de interacción del agua con el resto de los constituyentes encontrados en los alimentos, este parámetro aporta una medida del agua disponible para llevar a cabo las reacciones químicas o de desarrollo microbiano, lo que incrementa la descomposición de las sustancias y materias de interés. Para la conservación del grano gastado de cebada se deben tener valores de a_w bajos que permitan la preservación del grano (Bolaños, Lutz y Herrera, 2003).

El proyecto del diseño de un secador para los residuos de la cebada malteada generados en el proceso de la producción de cerveza se puede pensar desde los principios que la ingeniería verde sugiere (Gómez, 2008):

1. Es mejor prevenir la contaminación que tratar o limpiar el residuo ya producido.
2. Las operaciones de separación y purificación deberían diseñarse para minimizar el consumo de energía y el uso de materiales en general.
3. La complejidad del proceso se debe considerar como una inversión a elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar un residuo.
4. Satisfacer la necesidad que se presente y no ir más allá en los excesos sobredimensionando.
5. Cerrar ciclos de materia y energía del proceso lo más que se permita, tales como lo son los cierres de circuitos de agua que permitan un ahorro de este líquido.
6. Las entradas de materia y energía deberían ser renovables.

Los principios anteriores muestran que la ingeniería no solo se preocupa por el bienestar económico, también busca un bien ambiental, donde un residuo se puede considerar como materia prima desaprovechada. El trabajar este material (BSG)

representa una solución a un problema de tratamiento de desechos y un aprovechamiento de recursos económicos.

Nacen algunas interrogantes en la búsqueda de la solución al problema del aprovechamiento del BSG en la micro cervecería Diría, entre las que se plantean: ¿Cuenta la empresa con espacio suficiente para instalar un secador en sus instalaciones? ¿Cuánto es el contenido de humedad de partida en el grano posterior a la cocción de la cebada? ¿Cuáles son las condiciones adecuadas de operación del secador en laboratorio para obtener un grano que posea un porcentaje de humedad inferior a un 10.0 % y que se mantenga bajo este valor? ¿Cuánto es costo económico de poner en marcha un secador a nivel de planta junto con su equipo auxiliar? De todo lo anterior surge una pregunta central, que finalmente es la pregunta de investigación por resolver, ¿Es posible realizar un dimensionamiento de un secador que cumpla con las especificaciones que necesita y solicita la empresa?

Para dar con una respuesta a estas interrogantes se plantean una serie de objetivos de investigación:

Objetivo general:

Dimensionar un secador para los residuos valorizables producidos en la industria manufacturera de bebidas a base de malta de cebada.

Objetivos específicos:

1. Realizar un diagnóstico del proceso de producción en Diría micro cervecería.
2. Determinar la humedad inicial de los residuos valorizables producidos en Diría micro cervecería.
3. Determinar las condiciones de operación en el secado de la muestra.

4. Dimensionar el secador según las condiciones que necesita la planta micro cervecera.
5. Elaborar un análisis económico para la puesta en marcha del secador en la planta.

La construcción y puesta en marcha del secador cuenta con una limitación económica, debido a que la empresa se encuentra todavía en sus primeros años de operación, aunque crece continuamente, la construcción de un secador implica una salida significativa en su balance financiero y aunque la inversión de un secador se espera genere en un corto plazo ganancias para la micro cervecería, se debe buscar construir un equipo que se ajuste a un presupuesto accesible a sus necesidades.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

En el presente capítulo se exponen las bases teóricas que sustentan este proyecto, las cuales abarcan, por ejemplo: los tipos de secadores existentes y como hacer la adecuada elección para un diseño apropiado, fundamentos sobre el proceso cervecero, problemática sobre la disposición de los residuos valorizables de dicho proceso y posibles soluciones a esta situación.

2.1) Morfología del grano de cebada

El grano de cebada es un cereal rico en almidón y proteínas, se encuentra entre los cereales más importantes del mundo junto con arroz y el trigo. Morfológicamente este grano consta de tres partes principales: el germen o embrión, el endospermo (compuesto por la aleurona y el endospermo almidonado) y las cubiertas del grano. La cubierta del grano asimismo se conforma por la cubierta de la semilla (capas internas que rodean la aleurona) que a su vez es rodeada por el pericarpio y ésta finalmente por la cubierta de la cáscara. (Mussatto, Dragone y Roberto, 2006)

De acuerdo con Mussatto, Dragone y Roberto (2006) la cáscara provee al grano de una protección externa ya que es un tejido muerto multicapa compuesto principalmente de paredes lignocelulósicas y con pequeñas cantidades de proteínas, resinas y taninos. El pericarpio gracias a sus propiedades cerosas se puede ver como una membrana semipermeable, la interfase del recubrimiento del pericarpio es de utilidad para marcar el límite entre la sección interior y exterior del núcleo. En la Figura 2.1 se puede apreciar una representación esquemática de un corte longitudinal donde se ejemplifica de mejor manera las partes del grano de cebada.

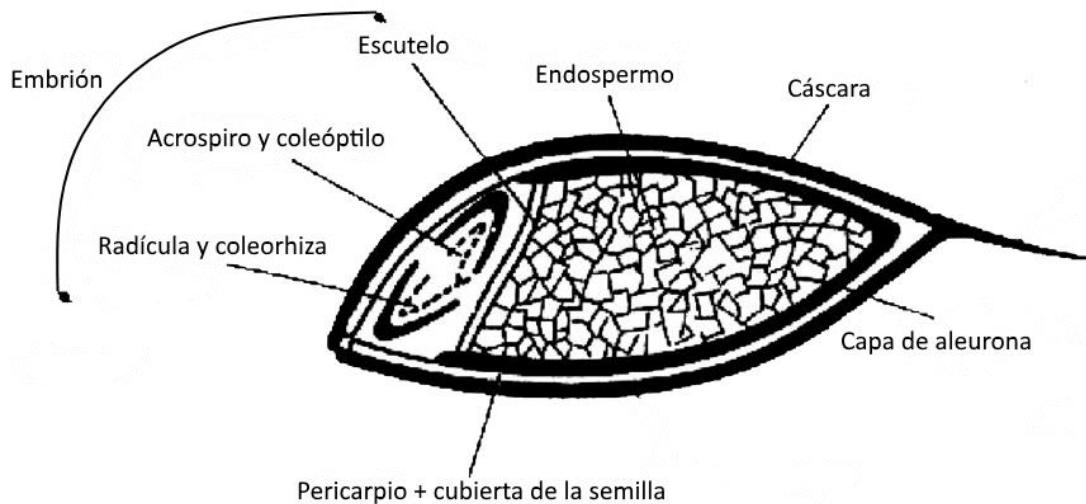


Figura 2.1. Representación esquemática del corte longitudinal del núcleo de cebada.
(Modificado de Mussatto, Dragone y Roberto, 2006)

2.2) Proceso de elaboración de la cerveza

Durante el proceso de elaboración de la cerveza uno de los pasos clave para lograr las características deseadas en la bebida es el malteado, el cual consiste en la obtención de un grano de cebada rico en enzimas (Sancho, 2015). Según Gupta, Abu-Ghannam y Gallagher (2010) durante el malteado ocurren tres procesos, en primer lugar se da el remojo del cereal, seguido de una germinación controlada que asegure un cambio físico y bioquímico dentro del grano, finalmente la germinación se estabiliza por medio de una operación de secado que baje sus niveles de humedad. A continuación, se referirá a la etapa del malteado y su almacenamiento.

2.2.1) Proceso general de malteado

Aunque las etapas de mayor relevancia en el malteado son las citadas anteriormente, el proceso de malteado como tal se compone de siete etapas en general: limpieza y selección del grano, almacenamiento de la cebada, remojo,

germinación, secado, eliminación de raíces y almacenamiento de la malta. Estas etapas se subdividirán en tres partes que se explican a continuación (Sancho, 2015):

2.2.1.1) Limpieza y selección de la cebada

Previamente a la realización del malteado es importante detallar la limpieza y selección de la cebada, en la etapa de limpieza son separadas las impurezas como piezas metálicas, piedras, arena, polvo y granos extraños que se puedan encontrar en combinación con los granos frescos y que contaminan la materia prima.

La selección consiste en separar los granos por tamaño para ser analizados en cuanto a calidad y composición, los que cumplan con los estándares establecidos pasan a ser acopiados por periodos de 6 a 8 semanas en tanques de almacenaje que no propicien las condiciones que dan pie a la germinación del cereal, aún (Sancho, 2015). La cebada se clasifica según el tamaño del grano, para lo cual se utilizan tamices de 2.5 mm, 2.4 mm, 2.2 mm, 2.0 mm, con la finalidad de maltearlos por separado (Mussatto, Dragone y Roberto, 2006).

2.2.1.2) Remojo, germinación y secado

- Remojo

El remojo tiene como objetivo fundamental transferir al grano de cebada la humedad necesaria que genera las condiciones propicias para la germinación. El aumento en los niveles de agua permite que esta actúe como vehículo de las sustancias que fluyen por el endospermo para nutrir al embrión, ya que durante este proceso se da la respiración de la semilla y la fermentación (Sancho, 2015).

Según Sancho (2015), la humedad teórica que se debe alcanzar en el grano de cebada es de 45 %, sin embargo, debido a la lentitud de absorción de agua por parte del

cereal no siempre se alcanza dicho valor, pero sí supera el 40 % de humedad. Esto concuerda con Gupta, Abu-Ghannam y Gallagher (2010), los cuales indican en su estudio que para un adecuado remojo la humedad en la cebada debe aumentar de un 12 % a por lo menos un 40 % como mínimo.

Aunado a lo anterior, el remojo debe cumplir que el grano no adquiera sabores extraños que no son propios de la cebada, por lo que el agua debe ser potable, los granos deben ser humedecidos uniformemente, se deben evitar los procesos fermentativos y el desarrollo de microorganismos debe ser bajo, lo que se logra controlando la temperatura generalmente entre 15 °C y 20 °C (Sancho, 2015).

- Germinación

Se basa en un periodo donde ocurren modificaciones morfológicas, químicas y biológicas en el grano. Morfológicamente se desarrolla una radícula formando de 3 a 5 raicillas, las células del epitelio se hacen menos transparentes y se da la segregación del grano (Sancho, 2015). Bioquímicamente, el embrión inicia con la segregación de enzimas que se difunden por el endospermo, se promueve la síntesis y la activación de las enzimas de la aleurona y el endospermo almidonado, incluidas amilasas, proteasas y b-glucanasas entre otros, estos cambios dependen de la variedad de cebada, humedad, aireación y temperatura (Mussatto, Dragone y Roberto, 2006). La energía que se necesita para la formación de enzimas procede del consumo de azúcares y cierta parte de algunas grasas, los procesos de degradación de azúcares son exotérmicos, por lo que se da un aumento en la temperatura durante el germinado (Sancho, 2015).

Lo que ocurre es que gracias a la hidratación que se da durante el remojo se conduce a la activación del metabolismo de la aleurona. Generalmente después del remojo

el grano se deposita en recipientes adecuados para el proceso de germinación que permiten mantener la cebada en contacto con una corriente de aire húmedo, esto a una temperatura de 15 °C a 21 °C. El proceso dura de 6 a 7 días, pero al final de este el endospermo almidonado se modifica completamente de manera uniforme (Mussatto, Dragone y Roberto, 2006).

- Secado

Como manera de detener el proceso de germinación se realiza la operación opuesta al remojo, el secado, con él se tiene como objetivo llevar el grano de cebada germinada hasta un 5 % de humedad, generando un cambio en las características de este cereal en cuanto color, sabor y aroma. La finalidad del proceso es detener la germinación y como se mencionó dar a la malta las características organolépticas deseadas según el tipo de cerveza (Sancho, 2015). Según Mussatto, Dragone, Roberto (2006) el secado se lleva a cabo hasta alcanzar de un 4 % a 5 % de humedad en un horno que trabaja uniformemente de 40 °C a 60 °C.

2.2.1.3) Eliminación de raíces o desgerminado y almacenamiento

La eliminación de raíces o desgerminado se realiza por fricción en equipos rotatorios, este proceso se lleva inmediatamente después del secado debido a que el germen o raicillas absorbe humedad rápidamente volviéndose elástico y tornándose difícil de eliminar, 100 kg de malta producen aproximadamente de 3 kg a 5 kg de raicillas (Sancho, 2015).

Finalmente, la malta se limpia de posibles granos vítreos remanentes o restos de piedrecillas y se almacena por aproximadamente cuatro semanas como mínimo, transcurrido este tiempo se le realizan pruebas que garanticen la calidad del grano y así corroborar que se encuentra en óptimas condiciones para utilizarse en la

elaboración de cerveza. En el almacenamiento se impide el ingreso de aire húmedo para evitar el crecimiento de microorganismos, sin embargo, la malta alcanza de 4 % a 5% de humedad en este tiempo, lo que produce importantes cambios físicos y químicos en el endospermo. (Sancho, 2015)

2.2.2) Generación del grano gastado de cebada (BSG) y Mosto

El mosto es la solución acuosa de los extractos una vez llevada a cabo la cocción del grano, este líquido es la sustancia que se fermenta para producir la cerveza. Con el fin de obtener el mosto se deben seguir una serie de procesos: la molienda de la malta, maceración, filtración del grano, cocción del mosto, enfriamiento del mosto e inyección de levadura (Sancho, 2015). Para efectos del presente proyecto es de especial interés la generación del Brewer's Spent Grain (BSG) ya que es el subproducto que se desea secar, este se obtiene durante la filtración del grano.

La molienda de la malta posibilita que las enzimas que contiene el grano actúen sobre los componentes de este, la operación se puede realizar con el material seco o húmedo, lo que abre las posibilidades de utilizar diversos tipos de molinos que se adecuen al material en este proceso.

La maceración tiene como fin que las sustancias insolubles de la molienda se vuelvan solubles, por lo que se mezcla la molienda con agua, las sustancias que entran en la solución se les denomina extracto (Sancho, 2015). Durante el macerado se da la degradación enzimática de los polisacáridos presentes en la malta, así se producen los carbohidratos fermentables, los cuales durante la fermentación se convierten en la cerveza que es el producto final. El proceso de maceración depende de la actividad enzimática y las enzimas a su vez dependen de la temperatura, razón

por la cual controlar este parámetro durante el macerado es realmente importante (Gupta, Abu-Ghannam y Gallagher, 2010).

La filtración del mosto permite que éste se separe de las partes insolubles no disueltas denominadas bagazo o BSG, como se ha mencionado antes este último es el material de mayor interés en este proyecto. Al mosto filtrado se le realiza una cocción durante un tiempo de 60 min a 90 min, en este proceso se adiciona el lúpulo que le transfiere componentes aromáticos a la mezcla. Finalmente, el mosto es enfriado para poder adicionar la levadura, después de este proceso se continúa con la producción de la cerveza que consta de fermentación y maduración, con lo cual se obtiene la bebida lista para ser embotellada (Sancho, 2015).

2.3) Características del grano gastado de cebada

El BSG, es entonces, un residuo extraído de la malta de cebada solo o mezclado con otros granos, cereales o productos de granos que resultan del proceso de producción de la cerveza, puede contener lúpulo, pero este no excede el 3% uniformemente distribuido (Fernández, 2014). El BSG se compone estructuralmente por la cubierta de la semilla, el pericarpio y la cáscara que cubrió al grano original de cebada, para este punto el contenido de almidón en el grano es bajo y dependiendo del proceso de maceración algunos residuos de lúpulo pueden haberse introducido en el grano (Lynch, Steffen y Arendt, 2016).

El grano gastado de cebada, como es de esperar, es el mayor subproducto que se genera de la industria cervecera, siendo alrededor de un 85 % del total de los subproductos; posee un alto contenido de proteína (20 %) y fibra (70 %) en base seca, en donde la fibra está conformada por alrededor de 17 % de celulosa, 28 % de polisacáridos no celulósicos y 28 % de lignina. Este contenido de proteína y fibra, lo

hacen ideal no solamente para alimentación animal, sino que, podría ser utilizada en la nutrición humana (Mussatto, Dragone y Roberto, 2006).

2.4) Subproductos obtenidos del grano gastado de cebada

Lo que hace al BSG un subproducto tan utilizado para consumo animal es que su proteína cruda, aminoácidos, fibra, grasas, vitaminas y minerales permiten los requerimientos nutricionales necesarios para animales monogástricos (caballos, perros, cerdos y aves) y poligástricos (ovejas, cabras y ganado de leche y/o carne). Debido a la cantidad y calidad de aminoácidos y proteínas se permite diseñar fórmulas para cerdos y vacas lecheras (Fernández , 2014).

Las raicillas del proceso, un subproducto que se recolecta de la desgerminación, se utilizan para la fabricación de levadura de panificación o en la industria biotecnológica debido a que poseen una riqueza enzimática aprovechable (Sancho, 2015). Las raicillas poseen un porcentaje de proteínas de un 25 % y niveles de fibra que van entre 11 % y 13 %, la composición fisicoquímica va a variar dependiendo de la variedad de cebada (Fernández , 2014).

El agua de prensa o licor de cerveza es un subproducto obtenido del uso de presión al BSG húmedo y se emplea como alternativa nutricional en la alimentación animal de cerdos y en algunos casos en ganado de leche, esto evita que sea visto como una amenaza ecológica al contaminar los cuerpos de agua (Fernández , 2014).

Según Finley, Walkera y Hautal (1976) el agua que se extrae del grano gastado de cebada contiene un 3 % de sólidos y la mitad de ellos se pueden eliminar por centrifugación. El agua de prensa clarificada (CPW por sus siglas en inglés) o agua de prensa, que se obtiene del BSG puede reciclarse a fin de obtener cantidades importantes de material fermentable. Estudios realizados demuestran que cuando

se han adicionado porcentajes de 5 %, 10 % y 20 % de CPW al mosto durante la cocción y antes de la ebullición, la cerveza obtenida mantiene el sabor esperado respecto a la cerveza control (producida sin el agregado de CPW). Por lo anterior, la inserción de este tipo de agua representa la recuperación y utilización de sólidos solubles que se pudieran perder en el proceso, se elimina un problema ecológico de contaminación de agua, además de ser un ahorro económico para la empresa.

Aunque principalmente la utilización de los subproductos se enfoca en la alimentación animal, otros sectores industriales han presentado especial interés en los beneficios del BSG, la industria farmacéutica, de alimentos y biotecnología entre ellos. Por ejemplo; los hidrolisatos y proteínas del BSG se utilizan como potenciadores de la textura en los alimentos gracias a sus propiedades como emulsificadores, por otro lado, pueden presentar efectos inmunomoduladores y actividad antimicrobiana. Además, los granos gastados de cebada son un buen recurso para ser utilizados como biomasa en la producción de biocombustibles (Vieira et al., 2013).

Según Mallen y Najdanovic-Visac (2018) los granos de BSG se pueden utilizar como fuente de carbono para la producción de bioetanol, biocombustibles para generar calor y electricidad y como una fuente de biogás. Estudios recientes también han demostrado que este grano se puede utilizar como materia prima para la producción de ácidos carboxílicos, butanol e hidrógeno.

Cherubini (2010) define el concepto de biorefinería como el procesamiento sostenible de biomasa en un espectro de productos comerciales y energía; según Mussatto, et al. (2013) en este campo se puede utilizar el BSG para lograr la obtención de productos como el xilitol, ácido láctico, carbón activado y ácidos fenólicos.

2.5) Tipos de humedad presentes en los materiales

Para describir el contenido de humedad de las sustancias se hace referencia generalmente a los conceptos de contenido de humedad en base húmeda, contenido de humedad en base seca, humedad en el equilibrio, humedad ligada, humedad no ligada y humedad libre (Treybal, 1988):

- Humedad en base húmeda: a menos que se especifique lo contrario se entiende que el contenido de humedad se expresa en base húmeda como:

$$\frac{\text{kg agua}}{\text{kg de sólido húmedo}} * 100.$$
- Contenido de humedad en base seca: Se expresa como $\frac{\text{kg agua}}{\text{kg de sólido seco}} * 100.$
- Humedad en el equilibrio X_e : Este es el contenido de humedad de una sustancia que se encuentra en el equilibrio con una presión parcial de vapor dada.
- Humedad ligada: Es la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio, menor que la del líquido puro a la misma temperatura.
- Humedad no ligada: Esta humedad ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.
- Humedad libre: Es la contenida por una sustancia, en exceso con respecto a la humedad de equilibrio.

Se pueden expresar gráficamente estos conceptos como se muestra en la Figura 2.2:

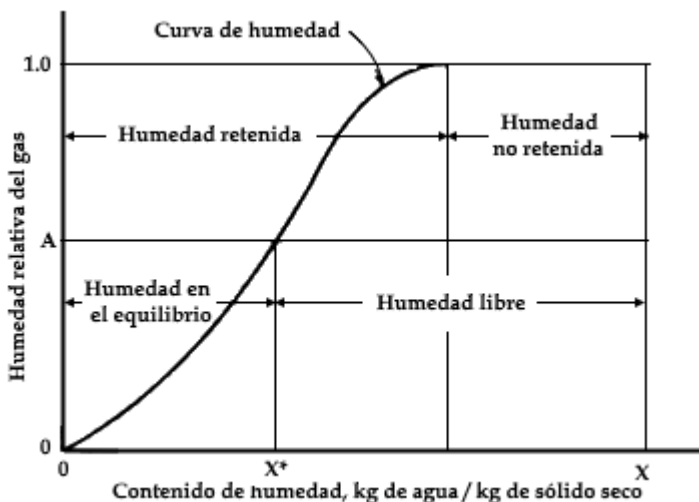


Figura 2.2. Comportamiento de los diferentes conceptos de humedad.
(Modificado de Treybal, 1988)

2.6) El secado, tipos y escogencia de secadores.

2.6.1) Fundamentos del Secado

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua o algún otro líquido de un material sólido, esto se realiza con el objetivo de llevar el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

Geankoplis (2006) define el secado como la operación mediante la cual se da una eliminación de agua de los materiales de proceso, sin embargo, este concepto se extiende también a la remoción de otros líquidos orgánicos como benceno o disolventes de los materiales sólidos.

En la industria agroalimentaria la mayoría de los productos son sólidos, en ella se refiere al secado como una forma de deshidratación, una operación básica por la que el agua que se encuentra presente en un sólido o una disolución se transfiere a

una fase fluida que lo rodea, esto gracias a los gradientes de actividad de agua (a_w) entre las fases (Fito et al., 2016).

En algunos tipos de materiales se puede realizar un tratamiento previo al secado a través de la extracción de agua presente en el material, por medio de métodos mecánicos, como la utilización de prensas y centrífugas entre otros. El objetivo de este tratamiento previo es disminuir la cantidad de agua a extraer por los métodos térmicos, lo que se refleja en un ahorro energético mayor y como consecuencia en un beneficio económico y ambiental (Geankoplis, 2006).

Aunque los métodos mecánicos son más económicos que los métodos térmicos, el porcentaje de humedad que se requiere alcanzar en productos sólidos no se obtiene utilizando únicamente un método mecánico de remoción de agua, ya que dicho porcentaje de humedad varía según el material y las necesidades que se tengan (Mora, 2014).

Como se mencionó, los métodos mecánicos no logran ser una herramienta lo suficientemente eficiente en algunos casos para llevar un sólido a un porcentaje de humedad deseado, razón por la que se recurre a métodos térmicos.

La energía necesaria para secar los productos es proporcional a la cantidad de agua que se requiere evaporar, depende de la cantidad y calidad del producto, esto en relación con su humedad inicial, la radiación solar, temperatura, velocidad y humedad del ambiente (Nandwani, 2013).

El secado se utiliza como técnica de preservación, ya que cuando se extrae agua a determinado material se disminuye la actividad del agua (a_w). Los microorganismos que se encargan de la descomposición de los alimentos no son capaces de crecer y multiplicarse a bajos valores de a_w , al igual que algunas enzimas que causan

cambios químicos en los alimentos. En el caso de los microorganismos la actividad microbiana se pierde o disminuye cuando se logra alcanzar un contenido de agua inferior al 10 % en peso en determinado material, si se logra eliminar agua de tal manera que la humedad en el producto este por debajo de un 5 %, se consigue preservar el sabor y su valor nutritivo (Geankoplis, 2006).

En el caso de la cebada, varios tipos de microorganismos la pueden afectar en su ciclo productivo e incluso luego del proceso cervecero. Algunos de los géneros de hongos más importantes que atacan a la cebada y prevalecen en los campos de cultivo son *Alternaria*, *Drechslera* y *Fusarium*, de estos ninguno sobrevive en un contenido de humedad menor al 12 % - 13 % ($a_w = 0.65$). En la etapa de almacenamiento en silo, se presentan los géneros *Aspergillus* y *Scopulariopsis*; mientras que en la cebada luego del malteado (BSG) prevalecen el género *Mucor*, cuyas especies necesitan un a_w mínimo de 0.90 - 0.94 para poder crecer, y especies de otros géneros como *Geotrichum candidum* (a_w min: 0.9), *Fusarium graminearum* (a_w min: 0.9) y *Fusarium culmorum* (a_w min: 0.9-0.91) (Krasauskas, 2017; P&K, 2018; Pitt y Hocking, 2009; BIOMIN Holding GmbH, 2018)

El principal motivo por el cual se aplica el secado es su preservación, sin embargo, también se busca facilitar el manejo del producto, permitir el empleo satisfactorio del material, alargar la vida útil de los mismos durante el transporte y almacenaje, además de aumentar el valor o utilidad de los productos residuales del proceso (Vian y Ocón, 1976).

2.6.2) Tipos de secadores en la industria

A nivel comercial existen muchísimos tipos de secadores, cada uno resuelve necesidades generales o muy específicas dependiendo del tipo de material por

secar. Algunos tipos de secadores usuales se comentan a continuación (Marcilla, 1999):

Secadores de bandeja y de túnel: Se utilizan para materiales granulares o particulados, en este equipo el material se coloca en bandejas que se pueden calentar por medio de serpentines o resistencias, mientras que el secado se realiza mediante la circulación de aire sobre el material. En otros casos el aire es calentado previamente a su entrada al secador, se puede utilizar recirculación de aire y recalentamiento antes del paso por las bandejas. En el caso de que el secador sea de túnel las bandejas se mueven en cintas transportadoras y el secado se da mediante una corriente de aire.

Secadores rotatorios: Generalmente se utilizan para el secado continuo de materiales a gran escala (0.3 kg/s o mayor). Está compuesto por tubos relativamente largos que giran alrededor del eje de un cilindro, su diseño contempla una pendiente para que el material alimentado por la parte superior del cilindro descienda por acción de la gravedad. En cuanto al aire, éste se alimenta por cualquiera de los dos sentidos ya sea en contracorriente o paralelo, con respecto al flujo de material. La calefacción puede ser directa cuando los gases calientes circulan sobre los sólidos, o indirecta cuando el material se encuentra en el interior de la carcasa y los gases en el exterior por lo que no hay contacto entre las dos sustancias.

Secadores de tambor: Este tipo de secadores se emplean para trabajar suspensiones o soluciones, son tambores cilíndricos interiormente calentados por vapor, con una velocidad de giro baja. La parte inferior del cilindro se encuentra sumergida en la suspensión o pasta a secar, durante el giro una parte del material es arrastrado y se seca en la superficie del tambor, seguidamente es retirada de dicha superficie por medio de cuchillas.

Secadores de spray (o aspersión): Con este tipo de secador se logra evaporar el agua de una suspensión o disolución de finas gotas o partículas si se produce una nebulización de ellas en una cámara donde circulan gases calientes.

Secadores de transporte neumático: Poseen una alta velocidad de secado, en este caso el material se encuentra finamente dividido, por lo que la superficie por unidad de volumen es muy grande. La introducción del sólido a secar se realiza de forma mecánica, mientras que los gases se suministran por la parte inferior del secador tomando las partículas y arrastrándolas hacia arriba en la columna, ahí las partículas se separan por medio de un sistema de colección de un ciclón. Es útil para secar ciertos tipos de alimentos, arcillas, talco, carbón, polímeros y materiales orgánicos.

Secadores solares: En su mayoría son de estructura sencilla y de fácil construcción, los cuales concentran la energía solar a fin de secar los productos de interés. Son especialmente utilizados en industrias a pequeña escala donde se poseen recursos financieros limitados y se requiere un diseño simple y fácil de construir. La mayoría de los diseños en secadores solares contemplan: el área de secado, el tipo de colector solar, algún medio para mantener el flujo de aire, ductos y tuberías; de manera opcional: una fuente de energía auxiliar, equipo de medición y control, una unidad de almacenamiento del calor (Mora, 2014).

Abed (2011) clasifica los secadores solares según tres categorías: directo, en el cual el calentador de aire (cámara) contiene el material a secar y la energía solar pasa a través de una cubierta transparente para llegar a los granos, el calor requerido para el secado es proporcionado por la radiación a las capas superiores y posteriormente es conducido a la cama de granos. Indirecto, aquí la energía solar se almacena en un colector solar separado donde se calienta el aire y este después se hace pasar a través

del material a secar. La tercera categoría es el secador mixto, este sistema combina los dos anteriores, el aire es calentado por un colector solar separado y posteriormente pasa a través de los granos, a su vez la cámara de secado absorbe energía directamente del sol.

2.6.3) Consideraciones a tomar en cuenta para escoger un secador

Cuando se desea seleccionar un secador, conviene realizar una lista de chequeo sobre las características importantes tanto del material a secar como de funcionamiento del equipo, Mujumdar (2015), plantea la lista mostrada en el Cuadro 2.1, que sirve de guía para no dejar por fuera los rasgos importantes a tomar en cuenta.

Cuadro 2.1. Lista de chequeo típica de características a tomar en cuenta para un proceso de secado

Ítem	Característica
Forma física de la alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • Granular, particulado, lodo, cristalino, líquido, pasta, suspensión, solución, láminas continuas, planchas, formas extrañas (irregulares o grandes)
Alimentación promedio	<ul style="list-style-type: none"> • Pegajoso, grumoso • kg/h (seco/húmedo); continuo • kg por lote (seco/húmedo)
Combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrocarburos • Gas • Electricidad • Biocombustibles
Operaciones antes y después del secado	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar si hay o no y cuáles • Tamaño medio de partícula • Distribución de tamaño
Para materiales particulados	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de partícula • Densidad aparente • Propiedades de rehidratación

Cuadro 2.1. (Continuación). Lista de chequeo típica de características a tomar en cuenta para un proceso de secado

Ítem	Característica
Actividad química, biológica o microbiológica	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar si existe
Sensibilidad al calor	<ul style="list-style-type: none"> • Punto de fusión • Temperatura de transición vítrea
Contenido de humedad al inicio y al final	<ul style="list-style-type: none"> • Base húmeda • Base seca
Isotermas de absorción (contenido de humedad en equilibrio)	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar si son necesarias
Tiempo de secado	<ul style="list-style-type: none"> • Curvas de secado • Efecto de las variables • Materiales de construcción • Corrosión • Toxicidad
Requerimientos especiales	<ul style="list-style-type: none"> • Soluciones no acuosas • Límites de inflamabilidad • Peligro de incendio • Requisitos de color / textura / aroma (si los hay)

Fuente: Mujumdar (2015)

Se recomienda tener la mayor cantidad de datos posibles antes de diseñar o seleccionar un secador, pero muchos de ellos pueden no ser requeridos dependiendo de las características del material a secar y la complejidad del proceso de secado requerido (Mujumdar, 2015).

Para seleccionar un equipo de secado adecuado debe sobresalir la facilidad de operación del equipo para obtener el producto deseado de la forma y velocidad especificadas, pero además se debe considerar el costo de inversión y de operación, así como no dejar de lado los costos de todo el sistema de separación que se involucran en el proceso, de manera que se logre hacer un costeo adecuado de todo el proceso de secado (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

Por otro lado, existen ciertos valores de flujo de material por secar que dan una idea del tipo de secador a escoger, se pueden tomar como un valor de referencia, aunque no son una regla rígida. Por ejemplo, si el flujo de producción de sólido seco es menor a (150 a 200) kg/h se considera el uso de un secador discontinuo, cuando este flujo es superior a (1 a 2) ton/h la opción a utilizar es un secador continuo, en el caso que el flujo másico de material a secar está en un valor intermedio se deben considerar otros factores extra para decidir entre un proceso continuo, semicontinuo o discontinuo (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

De manera complementaria al Cuadro 2.1, los secadores se pueden clasificar bajo ciertos criterios y estos datos son de utilidad para lograr esclarecer como enlazar el tipo de secador que se requiere con el tipo de material por secar y las condiciones que se tienen para trabajar, en el Cuadro 2.2 se muestran estos criterios de clasificación (Mujumdar, 2015).

Cuadro 2.2. Criterios de clasificación de secadores.

Criterio	Tipos
Modo de operación	<ul style="list-style-type: none"> • Lote o Batch • Continuo*
Tipo de alimentación de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Convección*, conducción, radiación, campos electromagnéticos, combinación de varios. • Intermitente o continuo* • Adiabático o no adiabático
Estado del material en el secador	<ul style="list-style-type: none"> • Lecho fijo • Lecho móvil, agitado o disperso
Presión de operación	<ul style="list-style-type: none"> • Vacío • Atmosférica*
Medio de secado (en secado por convección)	<ul style="list-style-type: none"> • Aire* • Vapor sobrecalentado • Gases de chimenea
Temperatura de secado	<ul style="list-style-type: none"> • Debajo del punto de ebullición* • Sobre el punto de ebullición (evaporación) • Debajo del punto de congelación

Cuadro 2.2. (Continuación). Criterios de clasificación de secadores.

Criterio	Tipos
Movimiento de flujos	<ul style="list-style-type: none"> • Co-corriente • Contracorriente • Flujo cruzado
Número de etapas	<ul style="list-style-type: none"> • Una etapa* • Etapas múltiples
Tiempo de residencia	<ul style="list-style-type: none"> • Corto (<1 min) • Medio (1 min - 60 min) • Largo (> 60 min)

*Más comunes en la práctica. **Fuente: Mujumdar (2015).

Como ya se ha mencionado un aspecto importante es el tipo de material que se debe secar, lo cual implica escoger un secador con base en su tipología. Un determinado material no está destinado a ser trabajado únicamente en un único tipo de secador, sino que puede calificar para varios equipos, esto es una ventaja ya que permite volver aún más versátil esta decisión para cumplir con la mayoría de los requerimientos que las empresas necesitan. En el Cuadro 2.3 se presenta una matriz de selección que permite ver que secadores son los más adecuados para cada material (Mujumdar, 2015).

Cuadro 2.3. Matriz de selección para secadores según el tipo de material a secar.

Naturaleza de la alimentación	Líquido			Tortas		Sólidos de flujo libre				
	Solución / Lodos / Pasta			Centrifugado / Filtrado		Polvo / Granular / Cristal frágil / Pellet / Fibra				
<i><u>Secadores de convección</u></i>										
• Secador de transporte por bandas							x	x	x	x
• Secador Flash				x	x	x	x			x
• Lecho Fluidizado	x	x		x	x	x	x		x	
• Rotatorio				x	x	x	x		x	x
• Aspersión	x	x	x							
• Bandejas (lote)				x	x	x	x	x	x	x
• Bandejas (continuo)				x	x	x	x	x	x	x
<i><u>Secadores de conducción</u></i>										
• Tambor	x	x	x							
• Rotatorio con vapor por chaqueta				x	x	x	x		x	x
• Rotatorio con vapor por tubería				x	x	x	x		x	x
• Bandejas (lote y continuo)				x	x	x	x	x	x	x

Fuente: Mujumdar (2015).

Debido a que el grano gastado de cebada es un material granular, el Cuadro 2.4 complementa con una matriz que permite profundizar aún más en cuales son los secadores más apropiados para trabajar este grano y cuales definitivamente deben descartarse (Perry y Green, 1997).

Cuadro 2.4. Clasificación de secadores comerciales para sólidos granulares, cristalinos o fibrosos

Tipo de secador	Usos y recomendaciones para sólidos granulares, cristalinos o fibrosos
Secador de congelado al vacío (liofilizador)	<ul style="list-style-type: none"> • Muy costoso. Usualmente utilizado para productos farmacéuticos que no pueden secarse satisfactoriamente por otros medios, o químicos finos.
Secador de bandeja	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para lotes pequeños. Se limpia fácilmente. El material se agita durante el secado, causando alguna degradación
Secador rotatorio al vacío	<ul style="list-style-type: none"> • Útil para lotes grandes de materiales sensibles al calor, o donde el disolvente se desea recuperar. El producto puede sufrir un poco de molienda, se recomiendan recolectores de polvo
Secador transporte por tornillo y secador rotatorio indirecto	<ul style="list-style-type: none"> • Poca pérdida de polvo. El material no debe ser pegajoso o sensible a la temperatura
Secador de lecho fluidizado	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para cristales, gránulos y fibras cortas
Secador de bandejas vibratorias	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para materiales de flujo libre que pueden ser transportados en una bandeja vibratoria
Secador de tambor	<ul style="list-style-type: none"> • N/A
Secador cilíndrico	<ul style="list-style-type: none"> • N/A
Secador infrarrojo	<ul style="list-style-type: none"> • Útil principalmente para secar la humedad superficial. No adecuado a capas gruesas

Fuente: Perry y Green (1997).

Cuadro 2.4. (Continuación). Clasificación de secadores comerciales para sólidos granulares, cristalinos o fibrosos

Secador dieléctrico	<ul style="list-style-type: none"> • Muy costoso
Secador de bandejas y compartimentos (gabinete)	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para operaciones por lotes. En grandes capacidades, el costo de inversión y operación es alto. Largos tiempos de secado.
Secador por lotes de circulación a través	<ul style="list-style-type: none"> • Usualmente no adecuado para materiales más pequeños que 30 mesh (0.595 mm). Adecuado para pequeñas capacidades y operación por lotes
Túnel de secado y bandejas continuas	<ul style="list-style-type: none"> • Esencialmente secado en bandejas de gran escala y operación semi continua
Secador continuo de circulación a través	<ul style="list-style-type: none"> • Usualmente no adecuado para materiales más pequeños que 30 mesh (0.595 mm). El material no se voltea, excepto en el secador Roto-louvre, el cual trabaja a altas temperaturas
Secador rotario directo	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para la mayoría de materiales en la mayoría de capacidades. La formación de polvo o abrasión por cristales limitará su uso
Secador de transporte neumático	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para materiales que se suspenden con facilidad en una corriente de aire. Muy adecuado para altas capacidades. El producto podría sufrir alguna degradación física
Secador por aspersión	<ul style="list-style-type: none"> • N/A
Secador de láminas continuas	<ul style="list-style-type: none"> • N/A
Secador de gabinete al vacío	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para operación por lotes en pequeñas capacidades. Útil para materiales sensibles al calor o fácilmente oxidables. Los disolventes se pueden recuperar

Fuente: Perry y Green (1997).

2.7) Energías limpias para operaciones de secado y uso de residuos agroindustriales.

2.7.1) Energías limpias utilizables en operaciones de secado

El uso de los combustibles fósiles como fuente de energía para diversas actividades humanas se ha intentado eliminar paulatinamente, dado que no es una fuente renovable ni limpia para el abastecimiento energético. Los esfuerzos para encontrar otras fuentes de energía son mundiales, y existen entidades completamente enfocadas con este objetivo. El Instituto de Investigación y Uso Agrícola (AURI por sus siglas en inglés), que radica en Minnesota, EE.UU., ha realizado un informe/plantilla, donde informa al público interesado los potenciales usos de energía renovable en su ubicación, dependiendo de las fuentes renovables disponibles. Algunas de las fuentes renovables que menciona dicho documento se resumen en el Cuadro 2.5.

Cuadro 2.5. Energías limpias para operaciones de secado

Fuente de energía	Ventajas	Desventajas
Residuos de cultivos	Aprovechamiento completo de la agro cadena. Puede usarse para alimentar diversos tipos de secadores.	El contenido de humedad de la biomasa para la incineración o gasificación debe ser bajo (menor al 20 %), y usualmente requiere ser "pelletizada".
Desperdicios animales	Gran cantidad de aplicaciones dependiendo de la fuente del desperdicio: gasificación, digestión anaerobia, compostaje, etc.	La combustión no es económica por el contenido de humedad y porque la pérdida del contenido de nitrógeno es problemática, además la cantidad de materia depende del peso de animal

Cuadro 2.5. (Continuación). Energías limpias para operaciones de secado

Fuente de energía	Ventajas	Desventajas
Desperdicios y residuos forestales	Puede ser una ayuda en la prevención de incendios forestales	No se conoce bien el impacto en suelos y especies forestales de remover los residuos de la industria maderera, por lo que no se puede tomar el 100 % de los residuos. No tiene tanta energía como los residuos de cultivos.
Energía eólica	No hay limitación en la cantidad por la fuente de la energía	Se ve limitada por la cantidad de tierra a ser destinada para un plantel eólico, y la cantidad de viento de la zona
Energía solar	Fuente totalmente limpia y renovable, además de que el flujo total de energía solar por año es muy grande. Puede aprovecharse para generar energía eléctrica o ser usada como energía térmica	No es una energía exportable, debe ser utilizada en el sitio, no se ha desarrollado una opción realmente eficiente en paneles solares. Es adecuada solamente para hogares o calentamiento de espacios comerciales.
Energía geotérmica/de la tierra	Mueven varias veces más energía de un lugar a otro que la energía utilizada para operar el sistema	Al igual que la energía solar, no es exportable y además depende de que exista un sitio donde se pueda aprovechar el calor de la tierra en su forma de vapor (geotérmica), o bomba de calor (sistema de energía de la tierra)

Fuente: AURI (2009) y Roos (2013)

Aparte de los esfuerzos en recabar energías limpias y renovables, la comunidad científica se ha dirigido a aumentar la eficiencia de los sistemas de energía. Por ejemplo, se puede usar el principio de la bomba de calor para diseñar “secadores de bomba de calor”, en donde el sistema aprovecha la compresión del aire húmedo, para posteriormente evaporar el agua del aire, lo que genera un aire seco que es más

fácil de calentar y más eficiente que un aire con una humedad específica elevada. Otra de las ideas es desplazar el agua con un disolvente de bajo calor de vaporización y alta presión de vapor, de manera que el secado sea menos costoso (Mujumdar y Jangam, 2011). Finalmente, dado que el secado es costoso, se aconseja examinar si una operación de disminución del contenido del agua de manera mecánica, previa al secado, podría ser más eficiente energética y económicamente. Entre dichas opciones se cuentan los lechos de secado, filtros y cribas, prensas, y centrífugas (Roos, 2013). Combinar fuentes de energía también es una opción ventajosa, por ejemplo, secadores que funcionan con energía solar y biomásica, aprovechando el calor residual que es absorbido en un diseño con materiales térmicos (Madhlopa y Ngwalo, 2007).

2.7.2) Aprovechamiento de los residuos agroindustriales

Los residuos agroindustriales constituyen una de las grandes contribuciones a la contaminación. Sin embargo, dichos residuos pueden ser utilizados y brindar un valor agregado a las áreas de producción que los generan, o bien ser aprovechados por otras industrias. En general, existen varios productos que se pueden fabricar a partir de los residuos, tales como biocombustible, pigmentos, polímeros biodegradables, compuestos bioactivos, compuestos saborizantes alimenticios, compostaje, producción de ácido cítrico y enzimas (Yusuf, 2017).

Las posibilidades crecen día con día para el aprovechamiento de los residuos de todo tipo de industrias, tanto que ahora están dejando de ser considerados residuos para llamarlos subproductos agroindustriales. Las técnicas y aplicaciones son explotadas y mejoradas, por ejemplo, con el uso de la fermentación en estado sólido se usan distintos microorganismos para producir varios de los productos mencionados anteriormente y otros como antibióticos, alimentos fermentados

comestibles (oncom y tempeh), biofertilizantes, proteínas de una sola célula (SCP, por sus siglas en inglés), biosurfactantes y xantano. Además, la fermentación en estado sólido ayuda a la producción de azúcares fermentables, por lo que se reduce la necesidad de cultivar fuentes de azúcar (Sadh, Duhan, y Duhan, 2018). Otras aplicaciones de los productos agroindustriales incluyen incluso aislantes acústicos y térmicos, o la creación de nanomateriales (Martínez, Kharissova y Kharisov, 2018).

2.8) Curvas de secado

Cuando se realiza un procedimiento experimental en el cual se mantienen constantes todas las variables y se determina periódicamente el contenido de humedad del sólido, se obtiene una serie de datos que al ser graficados de la forma X (contenido de humedad del material) vs t (tiempo transcurrido desde que inició la operación de secado) dan paso a lo que se conoce como una curva de secado (Fito et al., 2016).

Cuando se genera una curva de secado se pueden observar en ella tres zonas características que son: la zona de periodo de inducción, la zona de velocidad constante y la zona de velocidad decreciente, en la Figura 2.3 se muestran las tres zonas mencionadas anteriormente. En el periodo de inducción (A) se inicia el proceso de secado, aquí el material a secar se calienta y aumenta la temperatura de la interfase logrando que el producto se adapte a las condiciones de secado. La duración de este periodo va a depender de la humedad inicial del sólido, de su temperatura y la velocidad del aire, entre otros. Para los cálculos este periodo no se toma en cuenta ya que se considera que en su transcurso el secado tiende al régimen estacionario, por lo que en los periodos B y C es donde se centra el estudio de secado (Fito et al., 2016).

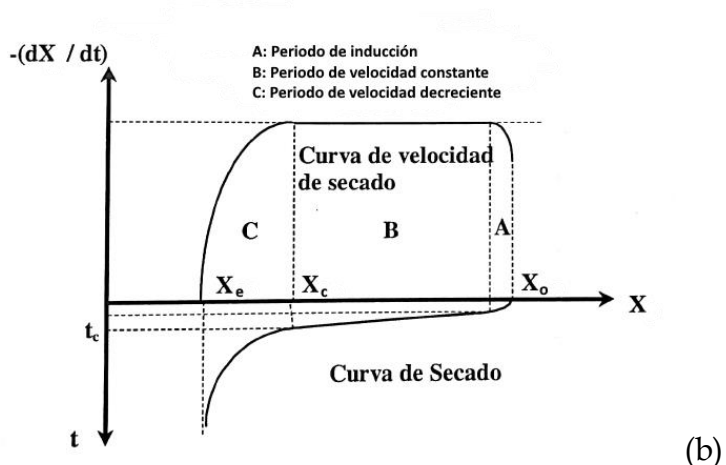
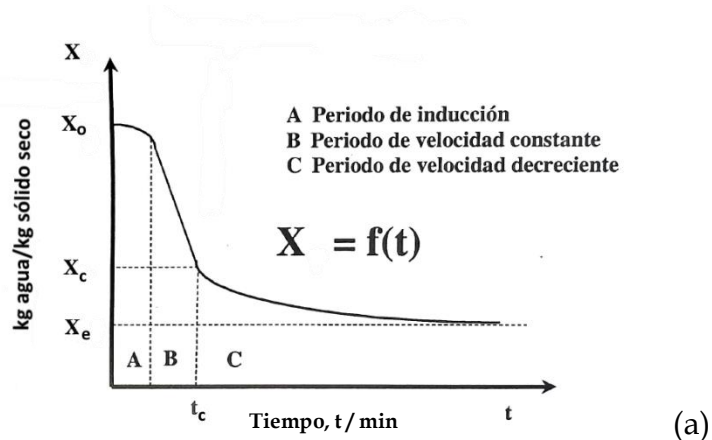


Figura 2.3. Curva típica de secado de materiales húmedos (a) y Curvas típicas de secado y de velocidad de secado (b).

(Modificada de Fito, Andrés, Barat, y Albors, 2016)

En el periodo de velocidad de secado constante (B) la superficie del material se mantiene constantemente mojada por lo que se comporta como una masa de líquido, este comportamiento se da debido a que la velocidad con que se elimina agua de la superficie del sólido es menor que la velocidad con que el agua se desplaza desde el interior del sólido hacia la superficie, por lo que la velocidad de secado es la velocidad de evaporación del agua, la cual es proporcional a la velocidad del flujo de calor que llega del aire al sólido. Debido a esto la temperatura de la interfase será constante y el calor se invierte únicamente en evaporar el líquido,

con el paso del tiempo el sólido se irá secando, al punto que la velocidad con que el agua llega a la superficie es menor que la velocidad de evaporación, esto conlleva a que toda la energía que llega del aire se utilice en evaporar el agua del material y no solo de la superficie, por lo cual parte de la energía se invierte en calentar el sólido, en este punto el contenido de humedad en el material se conoce como contenido de humedad crítico (X_c) (Fito, Andrés, Barat, y Albors, 2016). Cuando se llega a la humedad crítica ya no hay suficiente agua en la superficie para mantener la película continua de agua de la que se habló en el periodo de velocidad constante (Geankoplis, 2006).

Finalmente, en el periodo de velocidad decreciente (ver punto C en la Figura 2.3) la humedad en el material continúa disminuyendo hasta alcanzar la humedad de equilibrio (X_e), aquí las líneas que se obtienen pueden ser curvas, rectas o combinadas (Fito, Andrés, Barat, y Albors, 2016). En la Figura 2.4 se aprecia también el comportamiento combinado que se puede dar en la zona de velocidad decreciente.

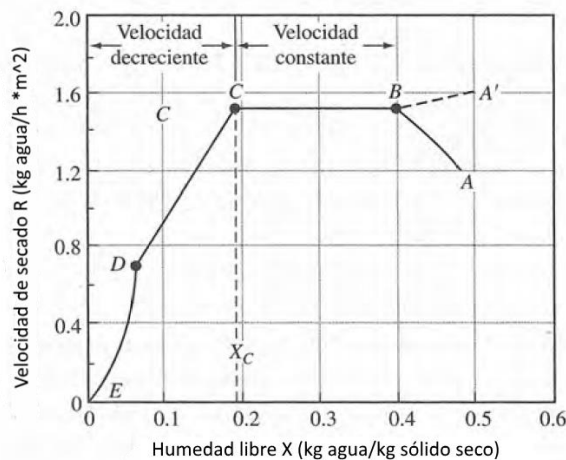


Figura 2.4. Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre.

(Modificado de Geankoplis, 2006)

No se tiene claridad sobre este comportamiento, pero se cree que cuando la caída de humedad es lineal con la velocidad de secado se supone que la evaporación del agua se realiza de la misma manera que en el periodo de velocidad constante, pero no ocurre en toda la superficie ya que aparecen zonas secas, por lo que la velocidad de secado disminuye conforme lo hace la superficie mojada. Cuando toda la superficie se encuentra seca pasa una de las dos cosas (Fito, Andrés, Barat, y Albors, 2016):

- Si existe un frente de evaporación que se desplaza hacia el centro del sólido, el vapor que se produce se desplaza a través del sólido seco hacia el exterior, entonces la velocidad de secado dependerá de la velocidad de difusión de este vapor.
- La otra opción recae en que la difusión se da por parte del líquido a través de la masa de sólido hasta llegar a la evaporación en la superficie del sólido, en este caso la velocidad de secado depende de la velocidad de difusión del líquido.

McCabe, Smith, y Harriot (2007) determinan las velocidades de secado en el periodo de velocidad decreciente en función de dos tipos de materiales, los porosos y los no porosos. El secado en materiales no porosos se dice que se realiza por difusión simple, este tipo de secado se caracteriza por realizarse lentamente debido a que la resistencia de la transferencia de masa de vapor de agua desde la superficie del sólido hasta el aire se considera despreciable y la velocidad la controla la difusión en el sólido. Para los sólidos porosos la difusión se da por capilaridad y hasta cierto punto por difusión superficial. En la Figura 2.4 se muestra en el punto D lo que se aprecia como un segundo punto crítico, sin embargo ese tipo de comportamiento no es común, ya que la velocidad constante es rara vez verdaderamente constante

y aunque en la velocidad decreciente pueden verse ciertos cambios a bajos contenidos de humedad, la transición no es lo suficientemente clara para lograr ver un segundo contenido de humedad crítico.

2.8.1) Cálculo del tiempo de secado en condiciones constantes

Las condiciones de secado constantes se dan cuando la temperatura, la humedad, la velocidad y dirección del flujo de aire a través de la superficie de secado son constantes; aunque las condiciones de la corriente de aire son constantes cabe destacar que condiciones como: el contenido de humedad en el sólido y otros factores cambian con el tiempo y la posición en el lecho.

Las curvas de velocidad de secado realizadas para un conjunto de condiciones se suelen modificar para otras condiciones y por lo tanto es de utilidad calcular el tiempo de secado a partir de la curva de velocidad de secado. Cuando se necesita estimar el tiempo de secado se tiene la siguiente ecuación por definición (McCabe, Smith y Harriot, 2007):

$$R' = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad 2.1$$

Cuando se integra la ecuación entre X_1 y X_2 ,

$$t_T = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R'} \quad 2.2$$

Donde X_1 y X_2 son los contenidos de humedad libre inicial y final, t_T : tiempo total de secado, m_s : masa del sólido seco, A : área para el secado y R' : velocidad del secado.

Para el periodo de velocidad constante $R' = R'_c$, R'_c : Velocidad en periodo de secado constante. La ecuación en este caso queda expresada de la siguiente manera:

$$t_c = \frac{m_s(X_0 - X_c)}{AR'_c} \quad 2.3$$

Para el periodo de velocidad decreciente la curva de velocidad de secado podría ser convexa hacia arriba, esto implica que la velocidad de secado cae menos rápidamente que el contenido de humedad, se puede realizar una aproximación, se puede asumir que la velocidad de secado es proporcional al contenido de humedad, por lo que $R' = a'X$, donde a' es un valor de proporcionalidad. Por lo tanto, de la ecuación 2.1 se tiene que (McCabe, Smith y Harriot, 2007):

$$a'X = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad 2.4$$

Como se encuentra ya en la región de secado decreciente los límites de integración van de X_c a X_2 , límite de humedad crítico y final respectivamente y como $a' = R'_c/X_c$ se obtiene para determinar:

$$t_T = \frac{m_s}{AR'_c} \left(X_0 - X_c + X_c * \ln \frac{X_c}{X_2} \right) \quad 2.5$$

Finalmente, si la curva de secado posee una caída muy pronunciada en la velocidad durante el periodo constante, no se puede asumir que la velocidad de secado es proporcional al contenido de humedad y por lo tanto la ecuación 2.5 no es aplicable, lo que conlleva a que los efectos de los parámetros de secado cambiantes no se fácilmente predecibles (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

Treybal (1988), respaldada la aproximación anterior asegurando que con frecuencia la curva de rapidez decreciente se puede tomar como una línea recta entre los puntos C y E de la Figura 2.4, ya que se tiene un faltante de datos de la sección curva.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la metodología experimental que se utilizó, donde se muestran los procedimientos para recopilar información sobre el BSG, detallando principalmente cómo se determinó el contenido de humedad y las curvas de secado que describen el comportamiento del material durante el proceso de remoción de agua en el secador de circulación de aire a través del sólido, a nivel de planta piloto.

3.1) Diagnóstico de la empresa, obtención de la muestra

El diagnóstico de la micro cervecería Diríá se realizó visitando sus instalaciones y conociendo el proceso de producción, además se midió el espacio disponible para colocar los equipos correspondientes al sistema de secado de los residuos de la empresa (BSG). La muestra se obtuvo de dicha empresa ubicada en Santa Bárbara de Heredia, latitud $10^{\circ} 2' 12.048''$, longitud $84^{\circ} 9' 47.792''$ a una altitud de 1125 msnm. El grano corresponde a la variedad Pale Ale Belga. En el momento que se recolectó el BSG se encontraba húmedo y con granos bastante enteros, como se aprecia en la Figura 3.1. En cuanto al almacenamiento del material se procedió a prensarlo de manera manual o con prensa hidráulica según sea el caso, para extraer la mayor cantidad de agua. Las muestras se depositaron en bolsas herméticas para ser almacenadas en un congelador para una mayor conservación y mantener las mismas condiciones en todas las muestras. Utilizando inicialmente un único lote para el estudio, dado que la empresa mantiene un almacenamiento alto de materia prima.



Figura 3.1. Apariencia del grano gastado de cebada al momento de la recepción de la materia prima.

(Fotografía tomada por Dania Cisneros, 2017)

3.2) Determinación de la humedad

El método oficial corresponde a la "AOAC Official Method 981.05 Moisture (Loss on Drying) in Malting Barley" (1982). La prueba se realizó en un horno marca Cole Parmer, ubicado en el Laboratorio de Análisis Químico de Alimentos de la Escuela de Tecnología de Alimentos en la Universidad de Costa Rica, a una temperatura de $130^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$. Se trabajó con un plato seco dotado con tapa y previamente pesado. La materia prima se homogenizó y de ésta se utilizaron aproximadamente 2 g para la determinación de la humedad en todas las muestras (prensadas y sin prensar). El horno se precalentó a $130^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ y posteriormente se ingresó el BSG. Transcurrida una hora se la muestra se tapó en el horno y se transfirió a una desecadora, cuando se encontraba a temperatura ambiente la muestra se pesó en balanza analítica, seguido se determinó el porcentaje de humedad en base húmeda. Se repitió el procedimiento anterior, hasta llevar la masa a peso constante, lo que tuvo una duración total de tres horas. Este proceso se realizó por triplicado.

La fórmula para realizar la determinación de humedad se muestra a continuación:

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de muestra}} \cdot 100 \quad 3.1$$



(a)

(b)

Figura 3.2. Balanza analítica (a), estufa de humedad (b) utilizadas para la determinación de humedad de las muestras.
(Fotografía tomada por Dania Cisneros, 2017)

3.3) Pruebas de prensado

Se utilizó la prensa hidráulica Carver ubicada en el Laboratorio de Análisis Químico de Alimentos de la escuela de Tecnología de Alimentos en la Universidad de Costa Rica. Experimentalmente se determinó el valor de presión a utilizar, mediante el cual se extrae la mayor cantidad de agua de manera mecánica.

Las pruebas se realizaron según la capacidad del equipo a diferentes valores aplicando una carga de: 1800 lb, 1600 lb, 1400 lb, 1200 lb, 1000 lb, 800lb, 600 lb, 400 lb, 200 lb por un tiempo de 3 min, también se realizó la prueba ejerciendo una fuerza manual por 3 min, manteniendo en todos los casos el área de trabajo sobre la que se ejerce la fuerza constante. El tiempo se establece de manera empírica como procedimiento estándar en el laboratorio por parte del personal, ya que después de

tres minutos el porcentaje de agua removida es despreciable. Se utilizó 600 g de BSG fresco para cada corrida. Este procedimiento se realizó por triplicado para cada magnitud de carga (Thompson, 2017).



Figura 3.3. Prensa hidráulica Carver, ubicada en el Laboratorio de Análisis Químico de Alimentos de la escuela de Tecnología de Alimentos en la Universidad de Costa Rica.
(Fotografía tomada por Dania Cisneros, 2017).

La fuerza manual se aplicó mediante la utilización del mismo sistema de émbolo/cilindro que se utiliza en la prensa hidráulica, pero la fuerza fue aplicada por el experimentador de este proyecto y la masa de la carga manual se registró en una balanza de piso. Este ensayo se realizó por triplicado. Se realizó un análisis estadístico de ANOVA para establecer diferencias entre las condiciones de prensado del material.

3.3.1) Presión de la carga aplicada

La prensa CARVER utilizada para prensar la masa de BSG posee un estándar de lectura dada en libras de fuerza aplicada al material, viene calibrada de tal manera que para conocer la presión aplicada a la muestras se debe dividir la lectura de la carga (lb) entre el área de aplicación de la misma. (CARVER, INC., 2004)

$$P = \frac{\text{Carga (lb)}}{\text{Área de aplicación de la carga (in}^2\text{)}} \quad 3.2$$

La prensa utilizada posee un área de aplicación de la fuerza de 14.46 in², con un diametro de 10.9 cm., en el Cuadro 3.1 se presentan los valores en psi para las cargas utilizadas. Por comodidad se seguirá tratando como carga aplicada, pero se debe entender que no se habla de presión.

Cuadro 3.1. Presión aplicada a las muestras de BSG según corresponda a la carga aplicada

Carga aplicada, W/lb	Presión aplicada, P/ psi
Manual (110 lb)	7.6
800	55.3

3.4) Diseño experimental para pruebas en el secador para determinar condiciones de secado

El equipo que se utilizó fue el secador de circulación de aire a través del sólido, ubicado en el Centro de Investigación en Tecnología de Alimentos (CITA) de la Universidad de Costa Rica, este equipo se muestra en la Figura 3.4. En el secador se varió las condiciones de temperatura (°C), velocidad del aire de entrada (m/s) y espesor (m) de capa de la muestra de BSG a secar.

El secador es un equipo automatizado, al cual se ingresan los valores deseados para las variables de temperatura y velocidad del aire de entrada. El aire es calentado

por medio de resistencias, cuando el sistema estabilizó las variables ingresadas se colocó la muestra en la cabina de secado. El sistema cuenta con una balanza incorporada, por lo que las mediciones de masa se realizaron sin extraer la muestra del equipo. Mientras se realizó la medición de masa el flujo del aire se desvió automáticamente por un ducto alterno. Las mediciones se continuaron en el tiempo hasta llegar a un 7 % humedad en base húmeda.



Figura 3.4. Secador con circulación de aire a través del sólido, planta piloto del CITA, Universidad de Costa Rica.
(Centro de Investigación en Tecnología de Alimentos, s.f).

Para realizar el diseño factorial, se escogió un diseño factorial 2^3 con el fin de conocer los valores óptimos de secado a nivel de laboratorio para el BSG. En el diseño factorial los factores de estudio fueron:

- T_0 = Temperatura de aire de entrada, °C
- v_0 = Velocidad del aire de entrada, m/s
- δ = Espesor de la capa, m

Las variables experimentales del diseño se plantearon como:

- Factores experimentales: Temperatura del aire de entrada ($^{\circ}\text{C}$), velocidad del aire de entrada (m/s), espesor de la capa de cebada malteada (m).
- Variable de respuesta: Tiempo de secado(s).
- Variable independiente: Temperatura ambiental ($^{\circ}\text{C}$), humedad del aire de entrada, humedad del aire de salida.

El diseño se planteó en el software Minitab 17, se realizaron dos ensayos para las dos cargas que se desean estudiar, estos diseños se muestran en el Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3.

Cuadro 3.2. Diseño factorial 2^3 realizado para la carga “Manual” de las corridas efectuadas en el secador del CITA.

Orden de corrida	Orden estadístico	Temperatura del aire de entrada, $T/^{\circ}\text{C}$	Velocidad de entrada del aire, $v/(\text{m/s})$	Espesor de capa de la muestra, δ/m
1	10	60	1.0	0.015
2	9	50	1.0	0.015
3	13	50	1.4	0.015
4	8	60	1.4	0.030
5	14	60	1.4	0.015
6	7	50	1.4	0.030
7	16	60	1.4	0.030
8	15	50	1.4	0.030
9	1	50	1.0	0.015
10	2	60	1.0	0.015
11	6	60	1.4	0.015
12	11	50	1.0	0.030
13	3	50	1.0	0.030
14	5	50	1.4	0.015
15	12	60	1.0	0.030
16	4	60	1.0	0.030

Cuadro 3.3. Diseño factorial 2^3 realizado para la carga de 800 lb de las corridas efectuadas en el secador del CITA.

Orden de corrida	Orden estadístico	Temperatura del aire de entrada, $T/^\circ\text{C}$	Velocidad de entrada del aire, $v/(\text{m/s})$	Espesor de capa de la muestra, δ/m
1	11	50	1.0	0.030
2	10	60	1.0	0.015
3	2	60	1.0	0.015
4	14	60	1.4	0.015
5	16	60	1.4	0.030
6	1	50	1.0	0.015
7	4	60	1.0	0.030
8	7	50	1.4	0.030
9	5	50	1.4	0.015
10	8	60	1.4	0.030
11	9	50	1.0	0.015
12	6	60	1.4	0.015
13	12	60	1.0	0.030
14	15	50	1.4	0.030
15	13	50	1.4	0.015
16	3	50	1.0	0.030

Para asegurar la aleatoriedad de las corridas se realizaron de la forma establecida en los cuadros Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3, difiriendo de lo que sería el orden estadístico. Las temperaturas utilizadas como valores de los niveles máximo y mínimo se establecieron con base en el estudio “Research in brewer’s spent grain drying process” (Aboltins y Palabinskis, 2005). El espesor de capa de determinó con base en las condiciones que el equipo permite, para su adecuado funcionamiento.

3.5) Curvas de secado para el BSG

Para la construcción de las curvas de secado se escogieron los datos de las corridas 4 y su réplica (corrida 12), efectuadas bajo las siguientes condiciones: 1 m/s y 60 °C para la velocidad y temperatura del aire de entrada, además de un espesor de capa 0.030 m para la torta.

En la elaboración de las curvas y obtención del tiempo de secado del material se siguió el procedimiento descrito por McCabe, Smith y Harriot (2007), para el cual se graficó el valor de la humedad en base seca contra el tiempo de secado, de aquí se obtuvo la ecuación de la curva, para la cual se calculó la primera derivada con respecto al tiempo. Con la ecuación de la primera derivada se construyó la gráfica de velocidad de secado del BSG contra la humedad en base seca. Para obtener la velocidad de secado se utiliza la ecuación 2. 1, evaluando la derivada en el intervalo de tiempo que duró el ensayo y tomando un área de bandeja de 0.038 m^2 (área de la bandeja utilizada en el laboratorio).

3.6) Determinación del agua absorbida posterior al secado

Estas curvas se realizaron en el Laboratorio de Biomásas de la Escuela de Química en la Universidad de Costa Rica. En este laboratorio se trabajó con una humedad promedio en el aire de 56 % y una temperatura ambiente promedio de $23.9 \text{ }^\circ\text{C}$. Las condiciones ambientales en dicho laboratorio son controladas diariamente para no superar una humedad relativa de $(60 \pm 5) \%$, sin embargo, no hay forma de controlar el valor al que pueda descender la humedad relativa según las condiciones ambientales.

Para esta prueba se utilizaron las muestras luego de haber sido sometidas a los ensayos de secado del diseño factorial. Se utilizó para realizar este ensayo la muestra a la que le fue aplicada una carga mecánica, que se secó bajo las mejores condiciones de los factores estudiados (espesor de muestra, temperatura y velocidad del aire), determinadas por el mismo diseño. Las condiciones utilizadas para el BSG prensado de manera mecánica fueron temperatura: $60 \text{ }^\circ\text{C}$, velocidad: 1.0 m/s y espesor de muestra: 0.030 m .

De las muestras que contaban con una humedad inferior al 10 %, se tomó aproximadamente 7.0 g de material y se colocaron en cajas de Petri que fueron expuestas a las condiciones antes descritas del laboratorio. La masa se midió de manera diaria por espacio de una semana en una balanza analítica, por la mañana a la misma hora con el fin de conseguir la mayor similitud en las condiciones de pesado. Finalmente se determinó la absorción de agua a través del tiempo por parte del BSG, por medio de un modelo matemático potencial. Esto se realizó por triplicado para cada muestra (Mata, 2018).

3.7) Resumen de los equipos utilizados en el trabajo

El Cuadro 3.4 muestra los principales equipos que se utilizaron durante la realización de este proyecto, en las distintas pruebas.

Cuadro 3.4. Equipos utilizados para la realización de proyecto.

Equipo	Marca	Modelo	Placa
Balanza granataria	ACCULAB	VA-Series	-
Estufa de secado	Cole Parmer	-	141851
Prensa hidráulica	Carver	Model C	3851
Balanza analítica	HIC weighting system	BP110S	315896
Secador de circulación a través	-	-	236478

A modo de resumen, se muestra en la Figura 3.5 un esquema de los pasos seguidos, para cumplir con la metodología anteriormente mencionada, que compone el trabajo de laboratorio, tanto para las muestras analizadas bajo un prensado manual como un prensado mecánico.

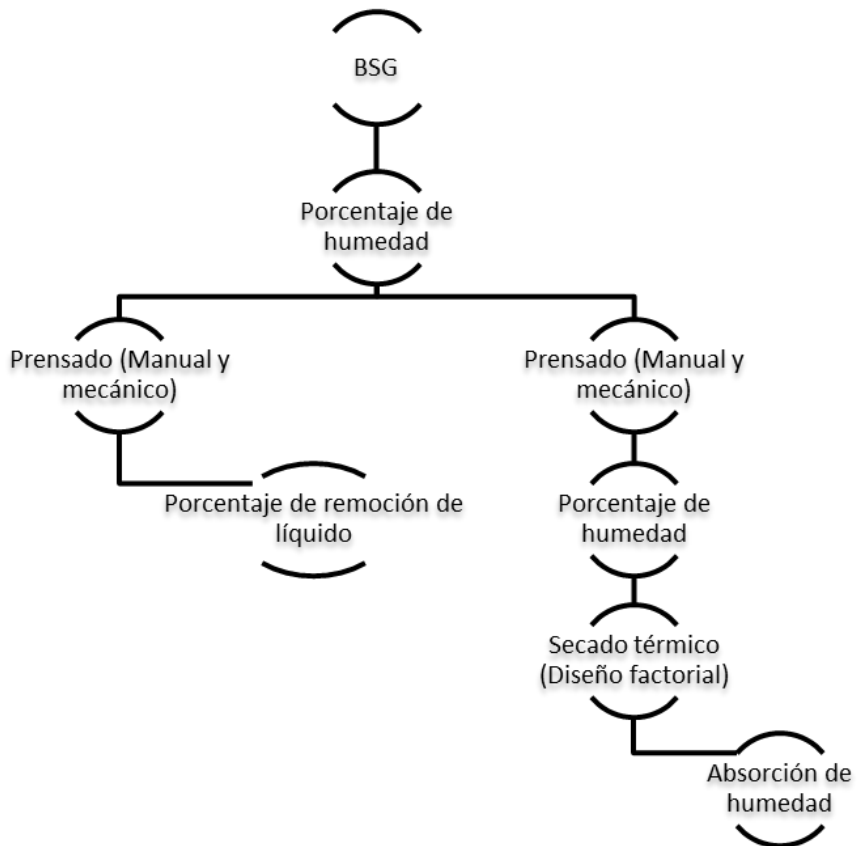


Figura 3.5. Metodología seguida en el el tratamiento y evaluación de las muestras (Elaborado por Dania Cisneros, 2019).

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo recopila la información, resultados y análisis que se realizaron a lo largo del desarrollo de este proyecto con el fin de ver la interacción de diversos factores en el BSG y su influencia en el tiempo de secado. Dichos factores estudiados son la aplicación de una carga como pretratamiento al secado, la temperatura y flujo de aire del utilizado en el secador y el espesor de capa del material a secar.

4.1) Diagnóstico de la empresa Diríá y distribución de planta actual

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la empresa se encuentra ubicada en Santa Bárbara de Heredia, durante el recorrido por las instalaciones se logró determinar en cuál etapa se generan los residuos que necesitan tratar, en este caso en su totalidad es el grano gastado de cebada y se produce durante en la cocción del grano. La empresa desea contar con un secador que posea la capacidad de procesar una cantidad de materia húmeda de 130 kg/día de residuos valorizables.

La planta cuenta con un espacio máximo reservado en su interior para la colocación del secador, la prensa y los implementos auxiliares que se requieran, en este caso el espacio disponible es de 2.40 m de ancho y 3.30 m de largo para un área total de 7.92 m², se cuenta con una altura máxima de 3.26 m del suelo al techo, las instalaciones cuentan con tomas de electricidad tanto de 220 V, como de 110 V. La Figura 4.1 muestra la distribución actual de la planta, en la misma se observa dónde se va a ubicar el secador posteriormente.

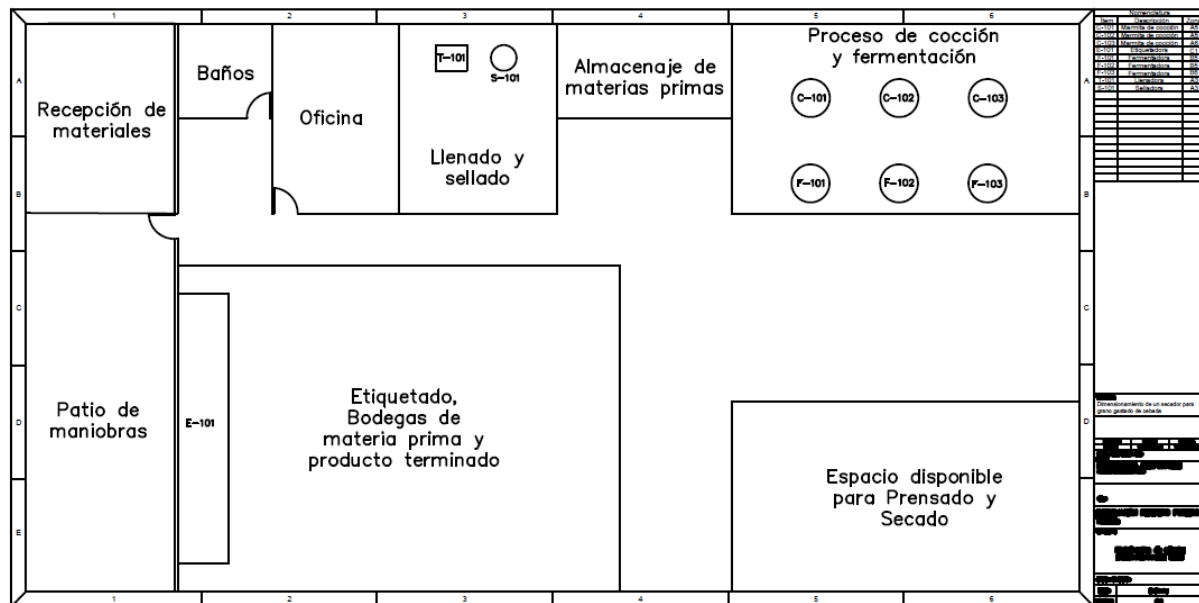


Figura 4.1. Distribución de planta actual en micro cervecería Diríá (Elaborado por Dania Cisneros, 2019).

4.2) Escogencia del secador a dimensionar

Con base en las consideraciones planteadas en el fundamento teórico de este proyecto se escogió realizar el dimensionamiento de un secador por lotes de bandejas con circulación de aire caliente a través del sólido. Los volúmenes de producción son bajos, de 130 kg/día, son inferiores a los 150 kg/h, por lo que se opta por un proceso por lotes o batch. Los secadores de bandejas poseen sus ventajas y desventajas como se mencionó con anterioridad, pero por la disponibilidad de espacio en la empresa es el tipo de secador que mejor se adapta.

La utilización de bandejas perforadas con circulación forzada a través del sólido se escogió ya que de esta manera se disminuye el tiempo de secado, con relación a la circulación transversal del sólido (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

En la planeación a pequeña escala para desarrollar un secado por lotes, se consideró una serie de factores, por ejemplo, la muestra no debe ser demasiado pequeña, se debe secar en una bandeja similar a la que se pondrá en uso a gran escala, se debe guardar la relación entre la superficie de secado y la superficie de no secado, al igual que la relación de la profundidad del lecho del sólido; la velocidad, temperatura, humedad y dirección del aire deben ser las mismas y constantes durante el proceso, esto a fin de desarrollar un secado de condiciones constantes (Geankoplis, 2006).

Con base en la selección del secador a dimensionar (el cual debe ser un equipo que permita secar sólidos granulares en lotes pequeños y minimizando lo más posible el tiempo de secado) se realizaron pruebas de laboratorio en el secador piloto del CITA, el cual es un secador de bandejas perforadas, con circulación a través del sólido, este secador fue capaz de alcanzar las temperaturas y velocidades de aire requeridas, utilizando el mismo suministro de energía (resistencias) que se desea a gran escala. Al ser un sistema controlado, se aseguraron condiciones de secado constantes durante todo el proceso y de esta forma se obtuvieron réplicas de los ensayos más confiables.

De esta manera se escoge un secador tipo gabinete, con bandejas perforadas y circulación de aire caliente a través del sólido, cuyos detalles se explican en las secciones posteriores.

4.3) Influencia del uso de una prensa hidráulica en el porcentaje de humedad del BSG.

Con el objetivo de comprender el efecto que tiene utilizar una prensa hidráulica como pretratamiento antes del secado térmico se determinó el porcentaje de humedad inicial en el BSG. El Cuadro 4.1 muestra que cuando el grano de cebada se extrae de la cocción posee un porcentaje de humedad bastante alto de 74.8 %, esto

concuerta con los valores reportados en la literatura según estudios previos, por ejemplo, Santosa *et.al.* (2002) reporta el porcentaje de humedad en el BSG mayor a 70.0 %, por su parte Aboltins y Palabinskis (2015) encontraron que el porcentaje de humedad en este desecho se encuentra en un rango de 77.0 % a 81.0 %. Los distintos valores en los porcentajes de humedad pueden deberse a variables como el proceso de cocción, la variedad de cebada utilizada, el proceso de malteado, la región geográfica entre otros.

Cuadro 4.1. Porcentaje de humedad de la muestra original de BSG determinado en estufa de humedad Cole Palmer.

Muestra	Humedad, $x / \%$
Original (Sin carga aplicada)	74.8 ± 0.8

Sin embargo, se debe aclarar que, para el caso de la cebada trabajada en este proyecto, esta no siempre presentó el mismo porcentaje de humedad (74.8 %) que se menciona en el Cuadro 4.1; dicho valor se obtiene si la muestra no se trata de ninguna manera. En su mayoría la cebada que se recibió para trabajar en el laboratorio presentó valores de humedad inferiores, debido a que la sustracción del grano posterior a la cocción se hace de manera manual, en la cual los trabajadores presionan el grano en una tela de cocción, por la que se filtra parte de la fase líquida. Como se esperaba, este proceso va a afectar el contenido de agua presente en la muestra ya que no siempre la extracción del grano la realizó la misma persona o con la misma fuerza, por lo que el contenido de humedad fue variable.

Debido a la facilidad del material a descomponerse se debió trabajar con diversos lotes para realizar pruebas previas, a estos se les determinó el porcentaje de humedad inicial con el que llegan al laboratorio. El Cuadro 4.2 presenta un resumen de los resultados, lo que comprueba que la humedad del lote de cebada varió hasta un 8 %.

Cuadro 4.2. Porcentaje de humedad de los diversos lotes analizados de BSG determinado en estufa de humedad Cole Palmer.

Muestra	Humedad, x / %
Lote I	70.1 \pm 0.2
Lote II	62.5 \pm 0.2
Lote III	67.1 \pm 0.2
Lote de trabajo	62.8 \pm 0.4

En la Figura 4.2 se presentan los resultados de las pruebas realizadas al utilizar diferentes cargas sobre una muestra cuya humedad inicial es de 70.1 %. Se logra apreciar que, al someter el residuo a una carga manual, la cantidad de líquido que se extrajo fue de apenas de 36.5 g (6.1 %); mientras que al incrementar la carga utilizando la prensa hidráulica se dio un aumento en el volumen de líquido eliminado, lo que concuerda con el comportamiento esperado.

Conforme se aumentó la carga aplicada al BSG, la cantidad en gramos de líquido extraído alcanzó un máximo, llegando a una estabilidad que se comenzó a ver a partir de las 800 lb y hasta las 1800 lb. La remoción promedio de líquido entre estas dos cargas es de un 44.2 %, este valor duplica la extracción de líquido en comparación con la remoción promedio entre los puntos de 400 lb y 600 lb que fue de 22.0 %. Pasadas las 800 lb, aunque se aumentó la carga hasta las 1800 lb el porcentaje de expulsión de líquido pasó únicamente de un 43.6 % a un 45.0 %, por lo que el comportamiento de extracción se considera prácticamente constante después de las 800 lb.

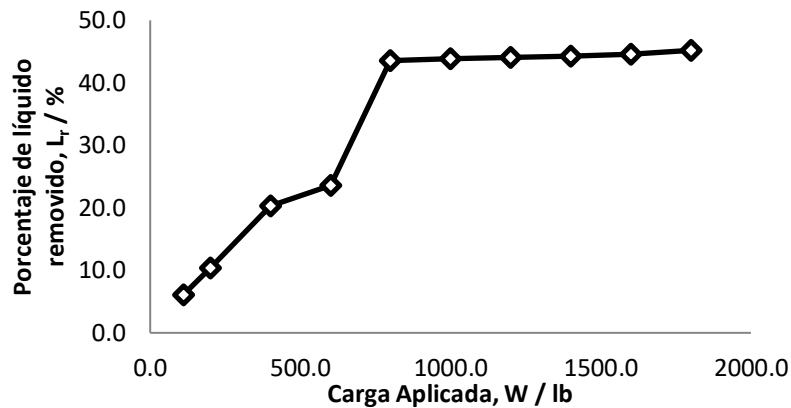


Figura 4.2. Porcentaje de líquido removido al BSG, prensando con carga manual (110 lb) y carga mecánica utilizando una prensa hidráulica (200 lb-1800 lb) (Elaborado por Dania Cisneros, 2018).

En la Figura 4.3, se puede ver de manera agrupada como no existen diferencias significativas entre las medias de la cantidad de líquido removido, cuando se aplican las cargas desde 800 lb a 1800 lb, lo que refuerza el criterio anterior sobre la estabilidad en el prensado al alcanzar las 800 lb.

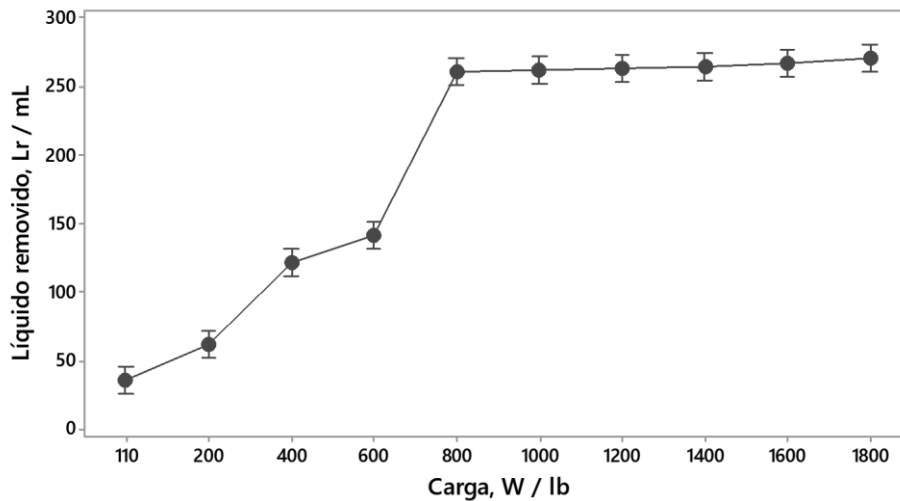


Figura 4.3. Análisis de medias para los intervalos de líquido removido vs carga aplicada al BSG. (Elaborado por Dania Cisneros, 2018).

De esta manera, se escogieron como cargas a utilizar para desarrollar el diseño factorial el prensado manual (110 lb) y 800 lb. El fin de seleccionar los valores

anteriores, fue comparar dos métodos de prensado (manual y mecánico) para así determinar si existe diferencia significativa en el tiempo de secado de las muestras.

Al ser el BSG un producto de fácil descomposición, para esta sección experimental se trabajó con un único lote, el cual posee una humedad inicial de 62.8 %. El Cuadro 4.3 muestra que el porcentaje de humedad baja a un 58.4 % cuando se aplica una carga de 800 lb y a un 61.0 % cuando se somete a la carga manual, como era de esperar el prensado mecánico disminuye el porcentaje de humedad de la muestra en mayor medida.

En este Cuadro 4.3 también se demuestra que la extracción de líquido realizada al grano húmedo no fue únicamente agua, ya que por ejemplo, para el caso de la muestra de BSG prensada de manera mecánica donde mediante la utilización de la prensa se extrajo un 22.2 % de líquido, se esperaba que el nuevo porcentaje de humedad bajara de 62.8 % (en la muestra sin prensar) a un 51.2 %; sin embargo la disminución de dicho porcentaje bajó únicamente a un 58.4 %. Por estas razones y mediante una observación del líquido obtenido del prensado, se encontró que en la extracción de líquido mediante prensado se extrae además de agua, algunos sólidos solubles.

Cuadro 4.3. Humedad y porcentaje de extracción de líquido en las muestras de BSG posterior al prensado.

Carga aplicada, W/ lb	Extracción de líquido por prensado, E_p / %	Humedad de la muestra, x / %	Humedad final esperada*, x_e / %
Original	-	62.8 ± 0.4	-
Manual (110 lb)	3.6 ± 0.1	61.0 ± 0.4	60.6 ± 0.0
800	22.2 ± 0.5	58.4 ± 0.4	51.2 ± 0.3

* Si toda la masa de líquido extraído fuese agua

Debido a todo lo anterior se pudo comprobar mediante datos, que el uso de una prensa hidráulica es más que necesaria para lograr un ahorro energético y un tiempo de secado menor con respecto al prensado manual.

4.4) Análisis de las condiciones de operación para el secador

4.4.1) Selección de la temperatura de operación para el secador

Según Sana et al., (2017), estudios realizados han determinado que en el proceso de secado a temperaturas superiores a los 60 °C el grano gastado de cebada sufre de deterioros en su sabor y se genera una decoloración marrón que no es visualmente deseada. Kissell y Prentice (1979), realizaron un análisis sobre el efecto de utilizar diversas temperaturas (45 °C, 100 °C y 150 °C) durante el secado del BSG, con el fin de utilizarlo posteriormente como sustituto de harina en la producción de galletas, para enriquecerlas con proteínas y fibra, los resultados fueron concluyentes en que a temperaturas superiores a 100 °C se da una disminución en los niveles de lisina que se encuentran en el producto, mientras que a temperatura de secado de 45 °C se dan los valores más elevados. Debido a su importante nivel nutricional es deseado que la lisina se encuentre presente en las galletas. Utilizar entonces temperaturas bajas durante el secado permite tener una harina de mejor calidad nutricional. Por esta razón la temperatura máxima de trabajo en el diseño factorial se fijó en 60 °C.

4.4.2) Secado de muestra prensada manualmente

Como se mencionó anteriormente se realizaron dos diseños factoriales 2^3 con el fin de estudiar el efecto de la variación del tiempo de secado que presenta el BSG al modificar espesor de torta a secar, la velocidad y temperatura del flujo de aire que

circula a través del secador tanto para el material prensado de manera manual como para el prensado realizado de manera mecánica.

Para analizar los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia se utilizó el software Minitab, del cual se obtienen los gráficos representados en la Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6. En la Figura 4.4 se observa cómo se cumple el supuesto de normalidad al graficar los residuos y encontrar que todos los puntos se alinean y distribuyen a lo largo de la línea recta.

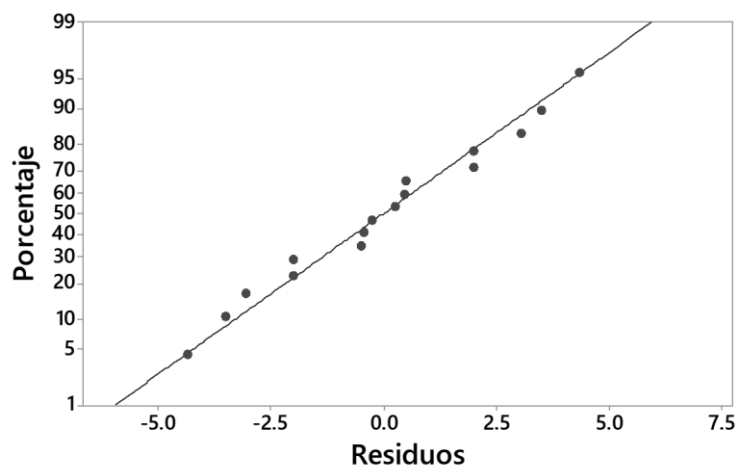


Figura 4.4. Gráfico de normalidad para el secado del BSG realizado posterior al prensado manual.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018).

En la Figura 4.5 se aprecia cómo al graficar los residuos vs. los valores ajustados (predichos) se tiene a lo largo de la horizontal un compartimiento simétrico pero aleatorio, aunque con una ligera forma de cono. Se optó por realizar una prueba Cochran para confirmar la varianza constante de los ensayos (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, 2006).

La prueba Cochran establece que dado un conjunto p de desviaciones estándar s_i , todas calculadas a partir del mismo número (n) de resultados replicados, se tiene que:

$$C = \frac{s_{max}^2}{\sum_{i=1}^p s_i^2} \quad 4.1$$

Donde s_{max} es la desviación estándar más alta en el conjunto, C es el número de Cochran, para el que se tienen tres opciones:

- Si la prueba estadística (C) es menor o igual que su valor crítico de 5 %, el supuesto de varianza es aceptado como correcto.
- Si el valor de (C) es mayor que su valor crítico de 5 % y menor o igual que su valor crítico de 1 %, el valor probado es dudoso.
- Si la prueba estadística es mayor que su valor crítico de 1 %, el valor probado es atípico.

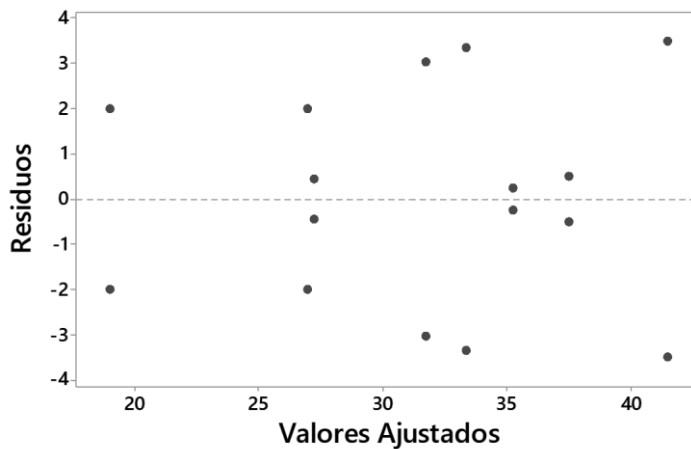


Figura 4.5. Gráfico de residuos vs valores ajustados para el secado del BSG realizado posterior al prensado manual.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

El valor crítico (5 %) de Cochran para un $n=8$ es de 0.680, mientras que el resultado de la prueba para los datos del prensado manual fue de 0.297, por lo cual se concluye que el ensayo presenta una varianza constante.

Para comprobar el supuesto de independencia se realizó una gráfica de los residuos vs. el número de corrida, en la Figura 4.6 se muestra que no existe ninguna tendencia en los puntos, por lo que no existe problema alguno con la declaración de independencia.

Una vez comprobados los supuestos anteriores se analizaron los efectos encontrados de las variables, en la Figura 4.7 se presenta el diagrama de Pareto, en donde se aprecia que las variable más significativas son la temperatura, seguido de la velocidad del aire y la interacción espesor-velocidad del aire, estos cruzan la línea crítica de referencia usada para un comportamiento normal usando un $\alpha = 0.05$, equivalente a un efecto estandarizado de 2.306.

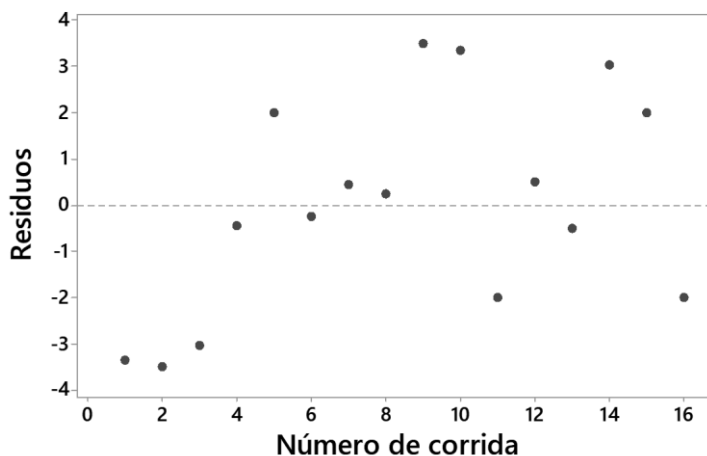


Figura 4.6. Gráfica de Residuos vs Número de corrida para el secado del BSG realizado posterior al prensado manual.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

Para estudiar los efectos principales se tiene el grafico de la Figura 4.8, se puede ver que, a mayor temperatura, mayor velocidad de aire y menor espesor, el tiempo de respuesta es menor. El efecto del espesor es poco significativo por sí solo como se observa en el Pareto y en la gráfica de efectos, mientras que es su interacción con la velocidad la que se debe considerar.

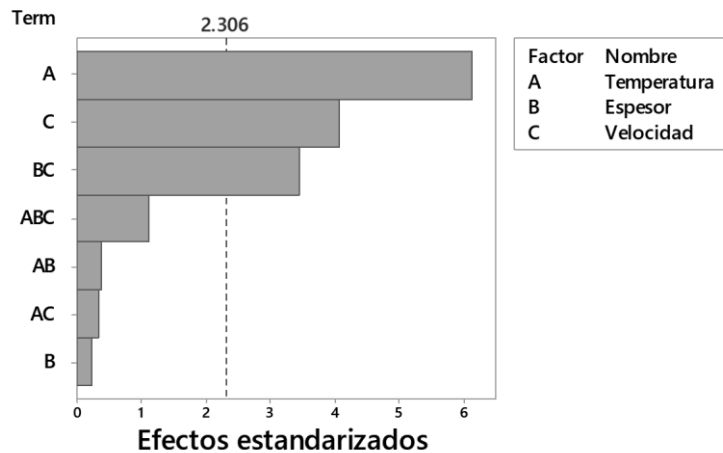


Figura 4.7. Cuadro de Pareto de los efectos estandarizados, para resultados de secado de BSG posterior al prensado manual.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

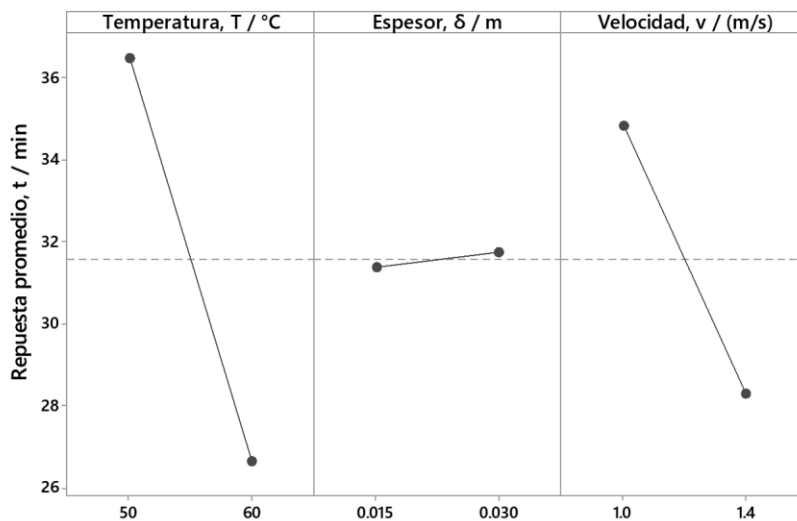


Figura 4.8. Gráfico de efectos principales para resultados de secado de BSG posterior al prensado manual.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

Cuando se analizó el efecto de la interacción de velocidad y espesor (Figura 4.9) se observó que la diferencia entre utilizar velocidad de flujo alta o baja es de 6.87 min, lo que según los tiempos de respuesta que se tienen es alto y es preferible usar velocidades altas con espesores bajos.

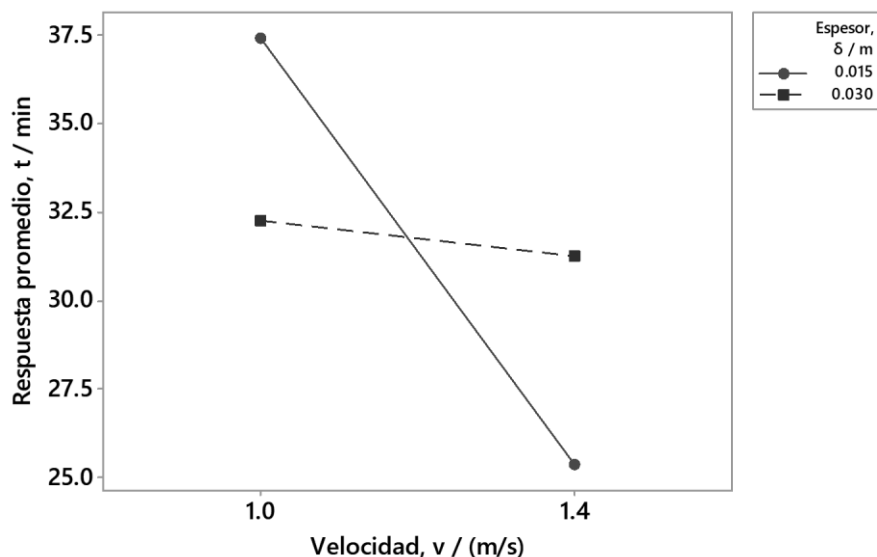


Figura 4.9. Grafica de efecto en la interacción del espesor en la velocidad de secador para resultados de secado de BSG posterior al prensado manual. (Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

El gráfico de cubo que se presenta en la Figura 4.10, representa el promedio de respuesta que se obtuvo para cada conjunto de variables y como se aprecia la respuesta más baja corresponde a las condiciones de velocidad de aire 1.4 m/s, espesor 0.015 m y temperatura de 60 °C. Las condiciones antes mencionadas presentan una diferencia en el promedio de respuesta de 8 min, con relación a la siguiente mejor condición que es velocidad del aire 1.0 m/s, espesor 0.030 m y temperatura de 60 °C. Se esperaba que la segunda mejor condición fuera por el contrario, velocidad 1.4 m/s, espesor 0.030 m y temperatura 60 °C, sin embargo como se aprecia en la Figura 4.9 al utilizar temperaturas altas y espesor alto la velocidad del aire no es tan influyente. Sumado a esto se tiene una desviación estándar de 2.83 min para ambos conjuntos de condiciones (60 °C, 1.4 m/s, 0.030 m) y (60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m), por lo que, al trabajar con condiciones de flujo de aire a nivel alto o bajo, cuando se utiliza un espesor alto, no hay diferencia significativa.

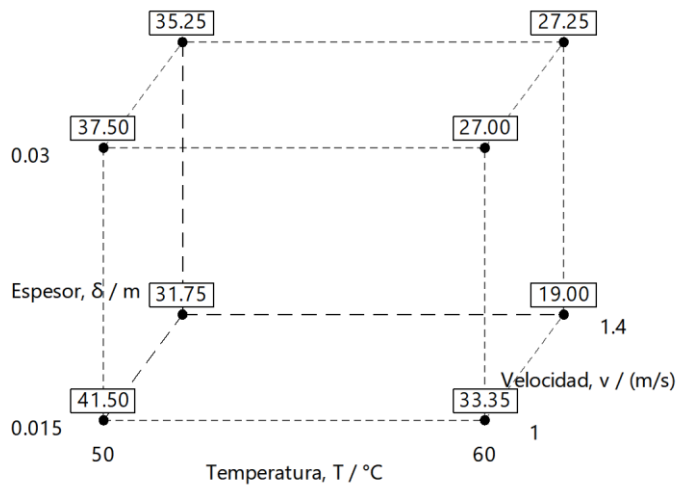


Figura 4.10. Gráfica de cubo, para resultados de secado de BSG posterior al prensado manual.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

4.4.3) Secado de muestra prensada mecánicamente (800 lb)

Para analizar el comportamiento que se obtuvo en el secado de una muestra prensada mecánicamente, se comprobaron los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia del modelo al igual que con el diseño anterior.

En la Figura 4.11 se encuentra que los puntos se distribuyen de una manera normal alrededor de la diagonal, por lo que se confirma el supuesto de normalidad. Por otra parte, en la Figura 4.12 se observa el gráfico de residuos vs valores ajustados, se presenta una simetría en los puntos a lo largo de la horizontal, y ligera forma de cono, por lo que se procedió a realizar una prueba Cochran para analizar la varianza constante. En la sección anterior se obtuvo que el valor de Cochran crítico del 5 % es de 0.680, el valor obtenido para este diseño factorial es de 0.315, razón por lo que se aprueba el supuesto de varianza constante de manera analítica.

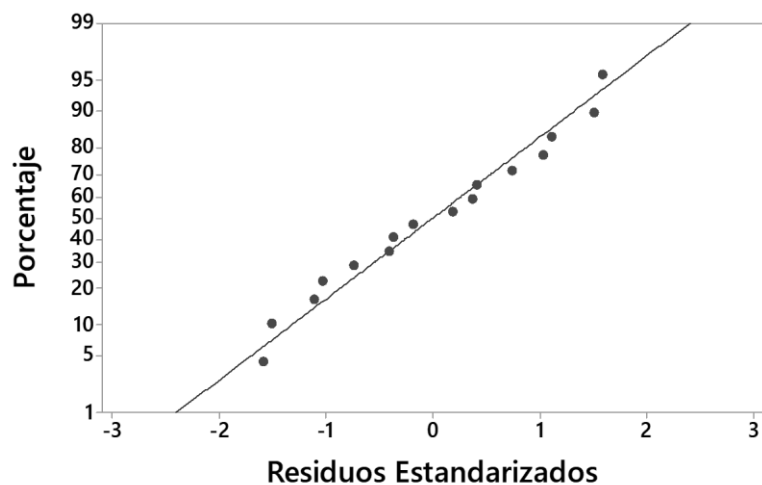


Figura 4.11. Gráfico de normalidad para el secado del BSG realizado posterior al prensado mecánico (800 lb).
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

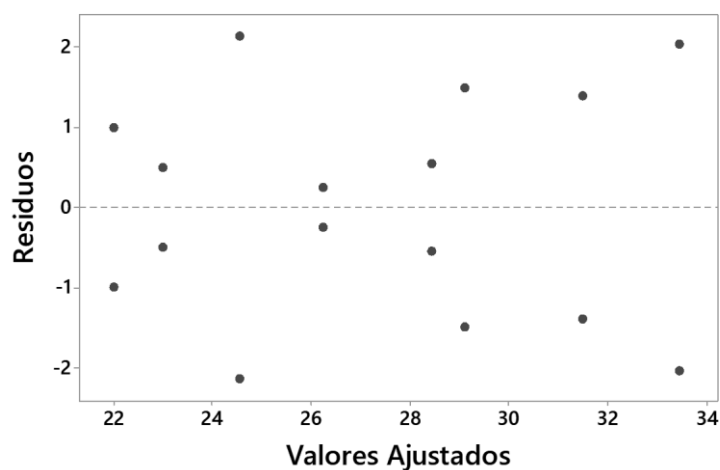


Figura 4.12. Gráfico de residuos vs valores ajustados para el secado del BSG realizado posterior al prensado mecánico (800 lb).
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

Finalmente, el supuesto de independencia viene dado por la aleatoriedad de los datos al graficar el orden de la corrida vs. los residuos, la Figura 4.13 confirma que no existe un patrón definido, los datos fueron recolectados de manera independiente y se acepta el supuesto de independencia.

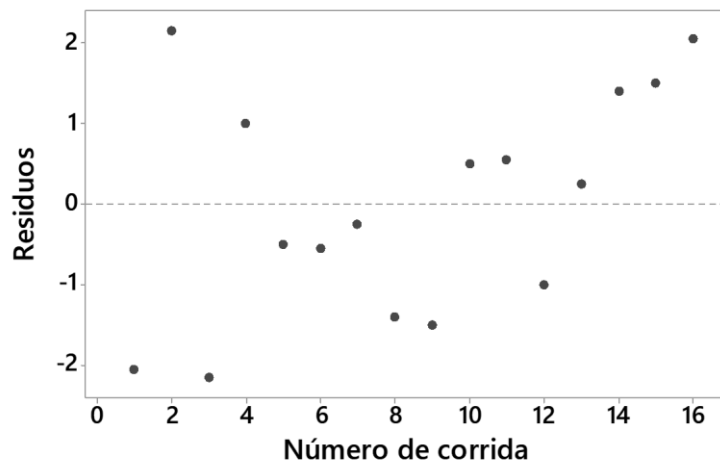


Figura 4.13. Gráfica de Residuos vs Número de corrida para el secado del BSG realizado posterior al prensado mecánico.
(Elaborado por Dania Cisneros 2018)

En la Figura 4.14, el diagrama de Pareto permite determinar que las variables significativas son la temperatura del aire y el espesor de la muestra, estos cruzan la línea crítica de referencia para un comportamiento normal usando un $\alpha = 0.05$, equivalente a un efecto estandarizado de 2.306.

Los efectos principales (Figura 4.15) permiten apreciar que, a valores altos de temperatura y velocidad de aire, utilizando espesores de muestra bajos, se obtienen las mejores condiciones de respuesta para el secado del BSG.

Del gráfico de cubo se puede inferir que, según lo que se esperaba, las condiciones óptimas son velocidad de aire alta (1.4 m/s), temperatura de aire alto (60 °C) y espesor de capa de BSG bajo (0.015 m). Analizando el comportamiento de la respuesta en el eje z (espesor) se identificó una conducta importante, al duplicar el espesor de 0.015 m a 0.030 m, la respuesta aumenta únicamente en 1 min, lo que representa una condición de trabajo aceptable. Por otro lado, si se trabaja a una velocidad de aire baja (1.0 m/s) el promedio de respuesta aumenta en 3.25 min, lo que significa que se puede trabajar a velocidades de aire bajas sin afectar

significativamente el tiempo de respuesta, este comportamiento se observó también en el prensado manual, por lo que se refuerza el criterio de poder trabajar a velocidades altas o bajas de aire, sin afectar de manera significativa los tiempos de secado. Por lo tanto, se presentan dos alternativas más a la condición óptima que no afectan la respuesta.

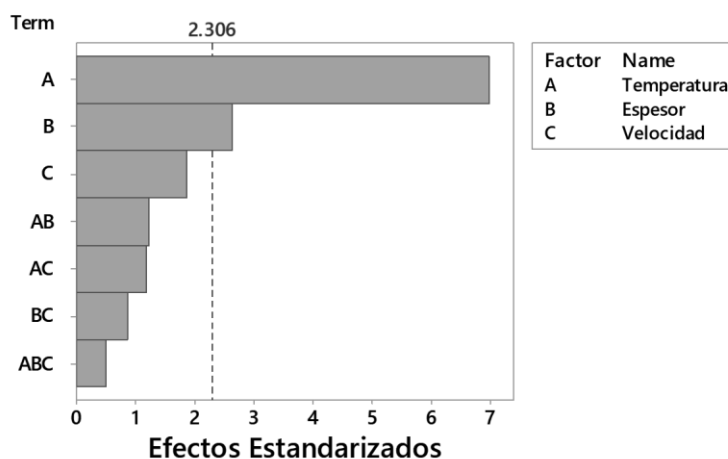


Figura 4.14. Cuadro de Pareto de los efectos estandarizados, para resultados de secado de BSG posterior al prensado mecánico.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

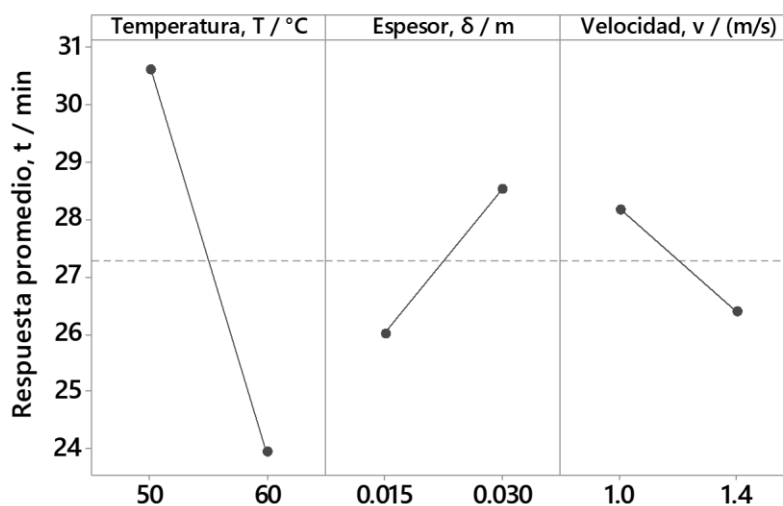


Figura 4.15. Gráfico de efectos principales para resultados de secado de BSG posterior al prensado mecánico.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

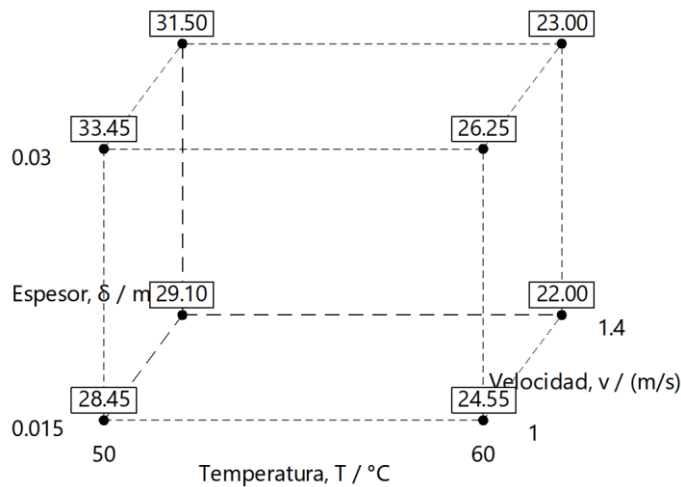


Figura 4.16. Gráfica de cubo, para resultados de secado de BSG posterior al prensado mecánico.
(Elaborado por Dania Cisneros, 2018)

4.4.4) Comparación del secado realizado luego del prensado manual (110 lb) y mecánico (800 lb).

De acuerdo con lo analizado en las secciones anteriores se trabajaron dos diseños factoriales 2^3 con la intención de comparar las condiciones de trabajo, bajo las cuales se obtienen los valores de respuesta menos elevados.

Si se analizan las gráficas de cubo para ambos diseños factoriales se puede observar que los tiempos de respuesta obtenidos en el secado de la muestra prensada manualmente, son mayores. Por ejemplo, cuando se compara el tiempo de respuesta para las condiciones de 50°C , 1.0 m/s y 0.015 m , entre ambos diseños (manual y mecánico) existe una diferencia de 13.05 min entre los promedios de repuesta.

El valor más bajo en tiempo (19 min) se logró con una muestra prensada manualmente bajo las condiciones de 60°C , 1.4 m/s , 0.015 m ; sin embargo, como se aprecia en el Cuadro 4.4 los valores de desviación estándar para las muestras prensadas de manera manual son elevadas, de hasta 4.95 min . El valor de 19 min

además es atípico (desviación estándar de 2.83 min) ya que es el único valor que, en comparación con su resultado homólogo bajo las mismas condiciones obtenidos para la muestra prensada mecánicamente, es menor.

En el prensado mecánico se aprecia que las magnitudes de la desviación estándar disminuyen para todos los juegos de datos, lo que genera valores de respuesta más estables.

Cuadro 4.4. Valores promedio para tiempos de respuesta en el secado del BSG realizado en el secador de la planta piloto del CITA.

Temperatura, $T / ^\circ\text{C}$	Velocidad, $v / (\text{m/s})$	Espesor, δ / m	Tiempo de respuesta para prensado manual (110 lb), t / s	Tiempo de respuesta para prensado mecánico (800 lb), t / s
60	1.4	0.030	27.25 ± 0.64	23.00 ± 0.71
60	1.4	0.015	19.00 ± 2.83	22.00 ± 1.41
60	1.0	0.030	27.00 ± 2.83	26.25 ± 0.35
60	1.0	0.015	33.35 ± 4.74	24.55 ± 3.04
50	1.4	0.030	35.25 ± 0.35	31.50 ± 1.98
50	1.4	0.015	31.75 ± 4.31	29.10 ± 2.12
50	1.0	0.030	37.50 ± 0.71	33.45 ± 2.90
50	1.0	0.015	41.50 ± 4.95	28.45 ± 0.78

Los tiempos de respuesta que se obtuvieron en el Cuadro 4.4 se midieron, en todos los casos, cuando el porcentaje de humedad alcanzó el 7 %, esto con el fin de dar un margen de seguridad y asegurar que el porcentaje de humedad en el BSG fuese inferior al 10 %.

Por los motivos anteriores se obtienen como las mejores condiciones de trabajo realizar un prensado mecánico a 800 lb (55.3 psi) por 3 min, seguido de una operación de secado con una temperatura del aire a 60 °C, una velocidad de 1.4 m/s y un espesor de capa para la muestra de 0.030 m. Sin embargo, como se explicará más adelante, por motivos energéticos, las condiciones a utilizar serán de

temperatura del aire a 60 °C, una velocidad de 1.0 m/s y un espesor de capa para la muestra de 0.030 m. Estas condiciones, como se mencionó anteriormente, se presentaron como una alternativa aceptable de trabajo.

4.5) Absorción de agua en el BSG posterior al secado

4.5.1) Deducción del modelo de absorción de agua para el BSG.

El objetivo final del secado es poder obtener un subproducto con un porcentaje de humedad inferior al 10 %, es de importancia que el BSG mantenga este parámetro durante su almacenamiento para poder ser aprovechado, razón por la cual se realiza un análisis de absorción de humedad en el grano según se explicó en la metodología experimental.

A nivel de laboratorio se obtuvieron los datos mostrados en la Figura 4.17, la muestra utilizada para el análisis se secó bajo condiciones de temperatura del aire a 60 °C, velocidad del aire a 1.0 m/s y espesor de capa de 0.030 m, por ser las mejores condiciones encontradas según el diseño factorial previamente analizado. A los datos obtenidos se les realizó un ajuste potencial, para lograr un modelo que permita determinar la velocidad de absorción de agua a través del tiempo, dicho modelo se presenta en la ecuación 4. 2 (Mata, 2018).

$$\Delta m = at^b \quad 4. 2$$

Dónde Δm , representa el cambio de masa en el tiempo con relación a la masa inicial, en un tiempo t estimado.

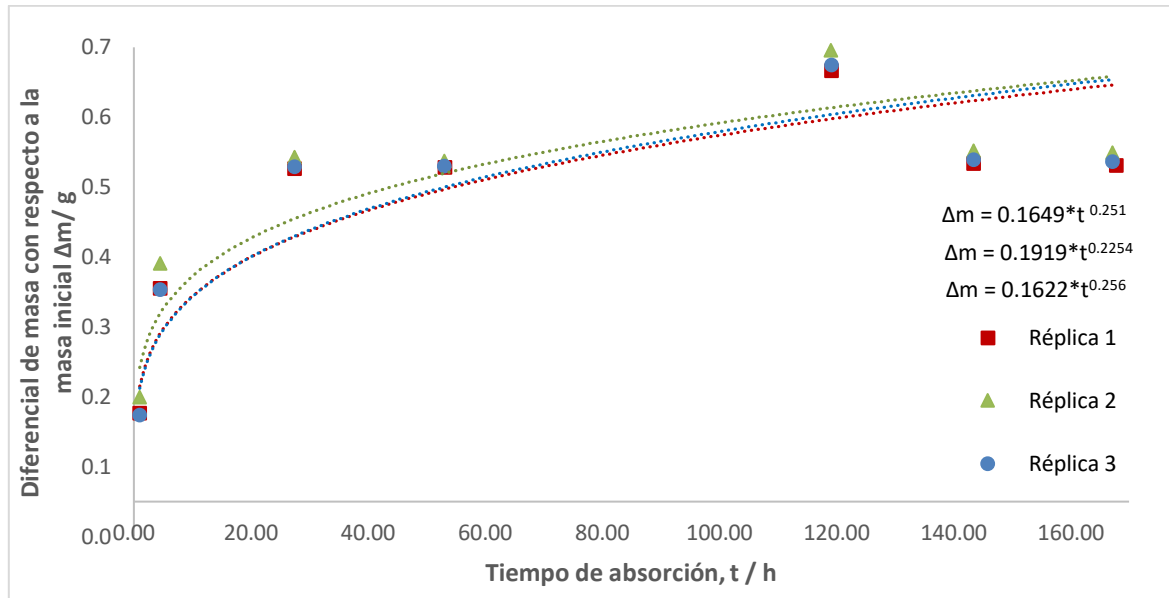


Figura 4.17. Curva de absorción de agua para muestras secas bajo parámetros de: Prensado mecánico, espesor de muestra: 0.030 m, velocidad de aire: 1.4 m/s, temperatura de aire: 60 °C.

Para determinar el modelo se realiza un ajuste potencial, característico de las curvas de absorción en biomásas, donde es exponente “b” de la variable “t” es cercano a 0.200, valor típico de este tipo de materiales (Mata, 2018).

En los gráficos se aprecia un comportamiento ascendente de la curva con el transcurrir del tiempo, pero esta no se estabilizaba, si no que oscila, esto ocurre ya que existe una pequeña variación de las condiciones ambientales y cambios en el porcentaje de humedad relativa del aire presente en el laboratorio, debido a factores externos y variables no controlables. Las condiciones de laboratorio, aunque se controlan, siempre presentan una pequeña variación (Mata, 2018). Para la muestra en estudio, se determina el modelo:

$$\Delta m = (0.173 \pm 0.016) * t^{(0.244 \pm 0.017)} \quad \mathbf{4.3}$$

Este modelo se obtuvo del promedio de las tres réplicas realizadas en el laboratorio.

4.5.2) Ejemplo de aplicación del modelo de absorción de agua para el BSG

La utilidad de este modelo determinado de manera experimental con una masa inicial promedio de 7.01 g, radica en que se puede obtener la absorción con relación a una masa inicial y un tiempo dados.

Si se desea conocer la razón de cambio en la masa a través del tiempo con relación a la masa inicial se calcula la fracción de avance (y) para la absorción de agua, a partir del modelo encontrado:

$$y = \frac{a}{m_0} t^b = B t^b \quad 4.4$$

Donde: a y b , son constantes obtenidas del modelo, t es el tiempo en horas, al que se desea estimar la absorción de agua y m_0 es la masa inicial utilizada en el laboratorio, en gramos.

La cantidad de agua absorbida tras dejar la muestra de BSG a condiciones ambientales durante una semana (168 h), es entonces:

$$y = \frac{0.173}{7.01} 168^{0.244} = 0.086 \quad 4.5$$

Como " y ", es la fracción de avance de la absorción de agua, para obtener el cambio en la cantidad de agua con relación a una masa inicial, se multiplica la fracción de avance por la masa inicial de sólido seco.

$$\Delta m = y * m_0 \quad 4.6$$

Del proceso de producción de Diriá se obtiene una masa inicial de 130 kg de materia húmeda. Posterior al proceso de prensado y secado propuesto en este trabajo se obtendrían 45.2 kg de material al 7% de humedad. Se tiene entonces que, según el

modelo de absorción determinado, una masa de 45.2 kg de material con una humedad de 7 %, trascurrido el tiempo de una semana, absorbería una cantidad de agua igual a:

$$\Delta m = 45.2 \text{ kg} * 0.086 = 3.89 \text{ kg} \quad 4.7$$

Esta cantidad de agua absorbida corresponde a un porcentaje de humedad en la muestra de 14.5 %. Con el fin de comparar este resultado, y corroborar la validez del modelo, una vez transcurrido el tiempo de absorción (una semana), se determinó el porcentaje de humedad presente en las muestras sometidas al estudio, el resultado se muestra en el Cuadro 4.5. Se puede observar que el valor teórico determinado con el modelo, concuerda con el valor obtenido de manera experimental, por lo cual se confirma la validez del modelo.

Cuadro 4.5. Resultados de humedad en las muestras de BSG posterior a la absorción de agua durante una semana. Determinado en estufa de humedad.

Muestra	Humedad posterior a la absorción, $x_a / \%$	Promedio de humedad posterior a la absorción, $\bar{x}_a / \%$
1	15.1 ± 2.9	
2	14.5 ± 1.6	14.8 ± 0.3
3	14.8 ± 0.5	

Sin embargo, debido a que la humedad promedio del Laboratorio de Biomásas es de 56 %, es importante realizar una corrección por factor de humedad, para que los datos se ajusten a las condiciones reales de la ubicación de la empresa, según la estación de Santa Lucía, ubicada en Barva de Heredia del Instituto Meteorológico Nacional el porcentaje de humedad promedio desde los años 1998 a 2016 corresponde a 81.3 % (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2018). La corrección viene dada por:

$$y = 3.89 \text{ kg} * \frac{81.3 \%}{56 \%} = 5.7 \text{ kg} \quad 4.8$$

Por lo que la absorción en 168 h dejando la muestra a condiciones ambientales en Santa Bárbara de Heredia es de 5.7 kg, lo que representa un incremento en el porcentaje de humedad de 7 % a un valor 17.5 %.

De igual manera a como se realiza el cálculo anterior, se realiza un proceso iterativo con valores de tiempo hasta llegar a un máximo tiempo de 0.75 h, donde el producto llega a una humedad del 10 %, por lo tanto, se recomienda almacenar el producto en recipientes herméticos, de manera que se pueda asegurar su preservación por un periodo prolongado de tiempo.

De este análisis se desprende que la mayor absorción de agua en la muestra se da en sus primeros minutos de exposición al ambiente, por lo que es necesario guardar el grano a la mayor brevedad, para evitar la hidratación del mismo.

CAPÍTULO 5. TIEMPO DE OPERACIÓN Y CAÍDAS DE PRESIÓN EN EL SISTEMA

En este capítulo se determina cuál es el tiempo de secado requerido para llevar el BSG a un valor de 7 % de humedad final, también se analizan las caídas de presión en el equipo, para lo cual se llevan a cabo una serie de cálculos que se presentan de manera detallada en la muestra de cálculo, a continuación, se exhiben los resultados más importantes.

5.1) Análisis de las curvas de secado y cálculo del tiempo total de secado para el BSG

Se midió de manera experimental la variación de la masa húmeda del grano gastado de cebada a lo largo del tiempo, conforme se hizo circular una corriente de aire caliente a través del grano. En la Figura 5.1 se muestran los resultados obtenidos para las corridas 4 y 12, donde se aprecia una pronunciada caída en la fracción de humedad en los primeros minutos, en ambas gráficas, demostrando una consistencia en su comportamiento.

Para determinar el tiempo de operación que el secador requiere, se utiliza la ecuación 2.5, donde es necesario conocer la rapidez de secado del material, este valor se encuentra al derivar la curva en la Figura 5.1. Se dividen los datos en tres secciones y se derivan las ecuaciones de las tres curvas encontradas, con el fin de lograr el mejor ajuste para todo el ámbito de datos, estos resultados se muestran en el Cuadro 11.50 y Cuadro 11.51. De manera gráfica, la Figura 5.2 muestra el comportamiento de la velocidad de secado al variar la fracción de humedad en base seca a lo largo del tiempo.

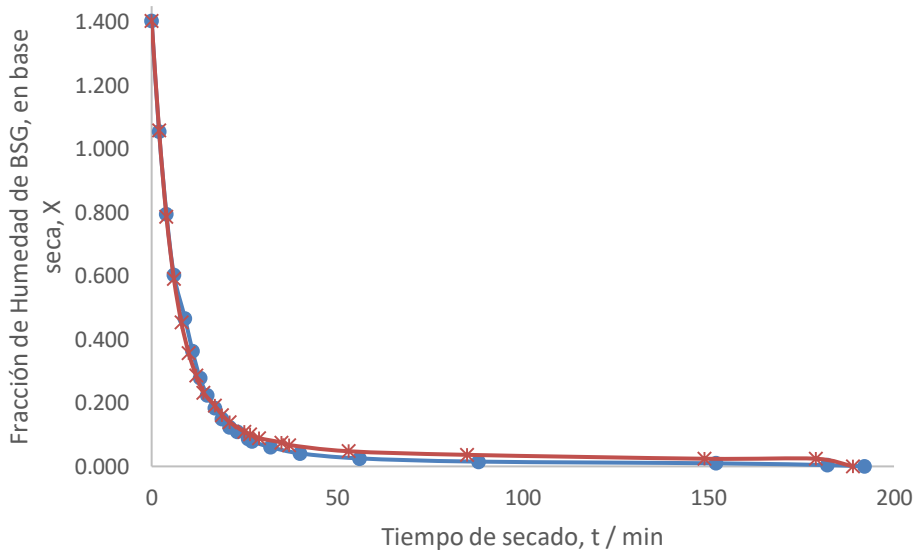


Figura 5.1. Comportamiento de la fracción de humedad en base seca del BSG contra el tiempo, para la corrida 4 (•) y corrida 12 (*) (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas a una carga de 800 lb.

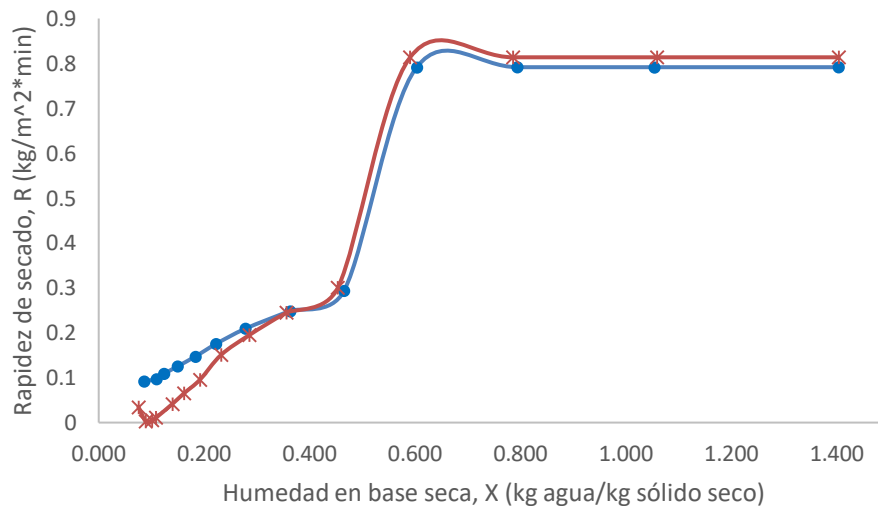


Figura 5.2. Curva de secado; comportamiento de la rapidez de secado del BSG contra la humedad en base seca, para la corrida 4 (•) y corrida 12 (*) (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas a una carga de 800 lb.

Según Treybal (1988), durante el segmento de la curva, donde la velocidad de secado permanece constante, la capa del sólido a secar se encuentra recubierta con una película delgada de agua, que se supone como humedad total no ligada. Los

capilares e intersticios del sólido pueden transportar rápidamente el líquido que se desea secar desde el interior del mismo hasta su superficie, de manera que la película delgada de líquido se mantiene constante en la superficie y por ende también la velocidad de secado; siempre y cuando se mantenga un flujo de gas con velocidad y dirección constante sobre la superficie del sólido. Sin embargo, cuando se alcanza la condición crítica, X_c (observado en la Figura 2.3), la película superficial de líquido se reduce tanto debido a la evaporación que se crean puntos secos en la superficie. Dado que la velocidad de secado depende de la superficie húmeda, la velocidad disminuye, dando inicio al período de secado superficial no saturado y la región decreciente de la curva de secado. Según McCabe, Smith y Harriot (2007), para los sólidos porosos, pasado el punto crítico en el periodo de velocidad decreciente, la humedad fluye a través de los poros del sólido por capilaridad, en donde la difusión de la humedad interna hacia la superficie del lecho (o de las partículas) puede limitar la tasa de secado.

En la Figura 5.2 se observa que al pasar el valor crítico de humedad en 0.600 (valor promedio) la caída en la rapidez de secado se da de forma acelerada hasta un valor promedio de 0.360. Con base en los fundamentos teóricos y los resultados experimentales obtenidos, para el período de velocidad decreciente se considera que la difusión del agua en el interior de la partícula se da de manera lenta hacia la superficie del grano, cayendo significativamente así la tasa en la velocidad de secado.

Una vez que se obtuvo la información de la curva de secado se procedió a utilizar la ecuación 2.5, para calcular el tiempo de secado que tomaría llevar la carga de aproximadamente 100 kg de BSG húmedo que se obtienen del proceso de prensado, hasta un valor de humedad de 7 % en base húmeda. Sin embargo, con el fin de

comprobar la validez del modelo dado por la ecuación 2.5, se calculó el tiempo de secado predicho por la ecuación para las muestras tratadas experimentalmente en el secador del CITA y se comparó con su valor real. En el Cuadro 5.1 se puede observar que el tiempo calculado con la ecuación 2.5 dio como resultado un valor de 14.84 min para la corrida 4 y 14.97 min para la corrida 12, lo que denota una consistencia en el modelo utilizado. Al comparar estos tiempos con los valores obtenidos de manera experimental, se obtuvo 26 min para la corrida 4 y 35 min para la corrida 12, para un porcentaje de diferencia de 43 % y 57 % respectivamente, dando como promedio una diferencia de 50 % aproximadamente. Esto denota que el modelo es inadecuado para predecir el tiempo de secado que se requiere para tratar el total de BSG húmedo, con valores inaceptables ya que el resultado teórico dado por el modelo es la mitad del valor real obtenido.

Cuadro 5.1. Tiempo de secado para el BSG, para las muestras que se secaron bajo condiciones de T , v y δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m, respectivamente, hasta llegar a un 7 % de humedad en base húmeda.

Corrida	Tiempo experimental de secado, t / min	Tiempo estimado de secado, t / min	Diferencia entre los tiempos de secado, t / min
4	26	14.84	11.84
12	35	14.97	20.03

Este problema de predicción del modelo se logra apreciar en la Figura 5.2, ya que, según McCabe, Smith y Harriot (2007), cuando la curva de secado muestra una pronunciada caída en la velocidad durante el periodo decreciente, la ecuación 2.5 no es aplicable para determinar el tiempo de secado. Según estos mismos autores, muchos de los secadores actualmente se diseñan solo sobre la base de consideraciones de transferencia de calor, por esta razón se siguió un procedimiento específico para el secado con circulación de aire caliente a través del sólido, este procedimiento se detalla en el siguiente capítulo.

5.2) Tiempo de operación del secador

Con el fin de determinar el tiempo de operación del secador se siguió el procedimiento establecido según McCabe, Smith y Harriot (2007), para un secador con circulación de aire a través del sólido. El resumen de los datos presentados en el Cuadro 5.2, muestra principalmente el área total expuesta que se tiene para el BSG, donde aproximadamente la mitad de los granos se encuentran enteros y la mitad se encuentran partidos en mitades debido al procesamiento.

Cuadro 5.2. Área total expuesta por las semillas de cebada.

Tipo de BSG	Masa de solidos secos, m_s / kg	Área superficial de partícula, A' / m^2	Área total expuesta, A_T / m^2
Entero	0.0000379	0.000117	86.77
Mitades	0.0000189	0.000059	43.39
Total	-	-	130.16

Con la información anterior se calculó el coeficiente de transferencia de calor por medio de la ecuación 5. 1:

$$h = \frac{k * 1.17 * Re^{0.585} * Pr^{1/3}}{D_p} \quad 5.1$$

Para dicho cálculo se consideraron las condiciones del aire de 1 atm (101 325 Pa) y temperatura de bulbo seco de 60 °C, además se requiere el valor de los números adimensionales de Reynolds y Prandtl los cuales se presentan en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3. Coeficiente de transferencia de calor para el BSG.

Reynolds, Re / adimensional	Prandtl, Pr / adimensional	Coeficiente de transferencia de calor, h / $\left(\frac{kW}{m^2 \cdot K}\right)$
211.32	0.720	0.169

Para determinar el flujo másico de aire se tomó en consideración que la superficie de la bandeja es de 0.6 m^2 , con una velocidad de aire de 1.0 m/s. Sobre la escogencia

de estos parámetros se profundizará en la sección de dimensionamiento del secador.

Además, se realizaron los cálculos para obtener la velocidad de transferencia de calor y el calor necesario para realizar el secado, mientras que el calor latente de vaporización se obtuvo de las tablas de aire seco, para una temperatura de bulbo húmedo de 29.8 °C, esto con el fin de determinar el tiempo necesario para secar la muestra, los resultados se plantean en el Cuadro 5.4:

Cuadro 5.4. Datos de calor necesario para llevar a cabo el secado.

Flujo másico del aire, \dot{m}_s (kg/s)	Velocidad de transferencia de calor, q / kW	Calor latente de vaporización, λ / (kJ/kg)	Calor necesario para el secado, Q / kJ
0.64	22.6	2430.31	135472.2

Finalmente, con la cantidad de calor por transferir (Q) y la velocidad de transferencia de calor (q) se calculó el tiempo que va a durar el material en secarse, de la siguiente manera:

$$t = \frac{Q}{q} \quad 5.2$$

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que, los secadores no son 100 % eficientes, según Couper, Penney, Fair, y Walas (2012), la eficiencia de los secadores de bandejas con circulación de aire através del sólido poseen eficiencias entre 18 % y 41 %. Para los calculos de este proyecto se considera un valor intermedio de 30 %. Aplicando este valor de eficiencia el tiempo de secado es de 5.54 h aproximadamente. Como se mencionó anteriormente, si se desea conocer los calculos realizados, en el Apendice C, de la sección C.7. en adelante.

La importancia de este cálculo, además de proporcionar un estimado del tiempo de secado es que se pueden variar las condiciones de velocidad del aire y área de las bandejas, de forma que se facilita realizar un cuadro comparativo sobre cuales son el conjunto de condiciones que generan un menor consumo energético. El Cuadro 5.5 compara el consumo en kilowatts que se da para dos de las mejores condiciones encontradas en el análisis del diseño factorial, se puede observar que utilizar una velocidad menor del aire implica un ahorro energético de 3.4 kW, esto no solamente reduce los costos energéticos, sino que se ajusta al caudal y tamaño existente de ventiladores comerciales. Por estas razones es que se trabajó con el conjunto de condiciones número II, del cuadro abajo mostrado.

Cuadro 5.5. Mejores conjuntos condiciones encontradas para funcionamiento del secador.

Opción	Velocidad, v / (m/s)	Temperatura, T / °C	Espesor, δ / m	Consumo energético, E / kW
I	1.4	60	0.30	26.0
II	1.0	60	0.30	22.6

5.3) Caídas de presión en el sistema de secado

Con el fin de determinar la potencia del ventilador, se calculó la caída de presión en el sistema. Según McCabe, Smith y Harriot (2007), en un ventilador la variación en la densidad del aire es tan pequeña que se considera adecuado trabajar el fluido como un fluido no compresible y de esta manera utilizar las ecuaciones empleadas para estudiar el funcionamiento de las bombas centrífugas.

Se realiza entonces, un balance de energía mecánica como se muestra a continuación:

$$\frac{P_1}{\rho} + gh_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2} + \eta W_p = \frac{P_2}{\rho} + gh_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2} + h_f \quad 5.3$$

Para analizar las pérdidas por caídas de presión en la tubería se tomaron dos consideraciones importantes, la primera es que el ventilador no realiza trabajo, la segunda es que se toma como punto de referencia el punto 1, de forma que h_1 es igual a 0. La pérdida de presión en el lecho se analizó por separado, y se abarcará lo referente a esta más adelante.

De esta manera despejando ΔP y cancelando los términos de trabajo y h_1 , la ecuación se transforma en:

$$\Delta P = \rho_a * \left(\frac{\alpha(v_2^2 - v_1^2)}{2} - gh_2 + h_f \right) \quad 5.4$$

Donde;

ρ_a : Densidad del aire, kg/m³

v : Velocidad del aire en el tramo de tubería, m/s

α : Factor de corrección de la energía cinética, adimensional

g : Gravedad, m/s²

h : Altura sobre el plano de referencia, m

h_f : Pérdidas de energía totales por fricción, J/kg

Se consideró cada tramo de tubería por separado, en total cuatro tramos distintos, el primer tramo comprende la parte superior de tubería del secador hasta la expansión, en el segundo tramo se considera la cámara de secado, el tercer tramo incluye la contracción y la parte inferior de la tubería secado, mientras que el cuarto tramo estudia la tubería vertical de recirculación. El número de Reynolds varía en cada segmento, para todos los casos el flujo se mantiene en régimen turbulento, lo

que conllevó a utilizar la ecuación de Swamee-Jain para determinar el factor de fricción de Fanning, de la siguiente manera:

$$f = 0.33125 \left\{ \ln \left[0.27 \frac{\varepsilon}{D_e} + 5.74 Re^{-0.9} \right] \right\}^{-2} \quad 5.5$$

Debido a que el flujo es turbulento el factor de corrección de la energía cinética (α), viene dado por:

$$\alpha = 1 + 0.78 f (15 - 15.9 \sqrt{f}) \quad 5.6$$

El Cuadro 5.6, muestra un resumen de los datos obtenidos para cada tramo de tubería.

Cuadro 5.6. Factor de corrección de la energía cinética, factor de fricción de Fanning y número de Reynolds

Tramo de tubería	Número de Reynolds, Re / adim	Factor de fricción de Fanning, f / adim	Factor de corrección de la energía cinética, α / adim
1	105577.79	0.0045	1.052
2	39591.63	0.0055	1.064
3	105577.79	0.0045	1.052
4	70385.13	0.0049	1.057

Para determinar las pérdidas de energía totales por fricción (h_f) se calcularon tomando en cuenta los diversos factores presentes en el sistema de secado, como longitud, expansiones, contracciones de la tubería en el equipo, factores de fricción y velocidades de flujo del aire. Esto mediante la fórmula:

$$h_f = \left(4f \frac{L_t}{D_e} + K_c + K_e + K_f \right) * \frac{v^2}{2} \quad 5.7$$

Donde;

f : Factor de fricción de Fanning, adimensional

L_t : Longitud de la tubería, m

D_e : Diámetro equivalente de la tubería, m

K_c : Coeficiente de pérdidas por contracción, adimensional

K_e : Coeficiente de pérdidas por expansión, adimensional

K_f : Coeficiente de pérdidas para el accesorio, adimensional

v : Velocidad del aire en el tramo de tubería, m/s

Con el fin de considerar las caídas de presión en el sistema, se analizaron las cuatro secciones anteriormente mencionadas en que se divide el secador, donde la velocidad del aire varía en cada una de ellas, por esta razón se tomó h_f total como la suma de los valores de h_f en cada sección de la tubería:

$$h_f = h_{f1} + h_{f2} + h_{f3} + h_{f4} \quad 5.8$$

Realizando el análisis por tramos de tubería, se realizaron las siguientes consideraciones:

- Para el primer tramo de tubería se toma en cuenta que K_f es el coeficiente para un codo de 90° y existe la pérdida por expansión K_e .
- En el segundo tramo de tubería no se tienen pérdidas por accesorios, contracción o expansión.
- El tramo tres presenta la pérdida por contracción K_c .
- Finalmente, el tramo cuatro considera pérdidas por accesorios de dos codos de 90° .

Una vez obtenidas las pérdidas por energía totales se calcularon los ΔP en cada tramo de la tubería utilizando la ecuación 5.4. En este caso se considera:

- Para el segundo y cuarto tramo la velocidad no varía.
- El tercer tramo no posee cambio en la altura del flujo.

En el Cuadro 5.7 se muestra el compendio de las caídas de presión en cada tramo de tubería.

Cuadro 5.7. Caída de presión en el sistema y pérdidas totales de energía por fricción

Tramo de tubería	Pérdidas de energía totales, h_f / (J/kg)	Caída de presión, ΔP / Pa
1	37.17	29.50
2	0.014	10.40
3	8.78	33.50
4	38.58	65.93

Además de las caídas de presión en la tubería, como se mencionó anteriormente, se debe considerar la caída de presión en el lecho de los granos de BSG, ésta se calculó mediante la ecuación de Ergun de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta P}{L_L} = \frac{150 v \mu (1 - \varepsilon)^2}{\Phi_s^2 D_{ep}^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75 \rho v^2 (1 - \varepsilon)}{\Phi_s D_p \varepsilon} \quad 5.9$$

Dónde:

L_L : Longitud del lecho, m

v : Velocidad superficial del aire, m/s

μ : Viscosidad del aire, N*s/m²

ε : Porosidad del lecho, adimensional

D_{ep} : Diámetro equivalente de la partícula, m

Φ_s : Esfericidad de la partícula, adimensional

ρ_a : Densidad del aire, kg/m³

Según Caro-Greiffenstein (1998), la porosidad de la cebada es de 55 %, por lo que se tomó este valor teórico. Según McCabe, Smith y Harriot (2007) la esfericidad de cilindros cortos se puede considerar con el valor de 1. Tomando estas

consideraciones se calculó la caída de presión en le lecho según la Ecuación 5. 9, obteniendo como resultado 171.4 Pa.

En comparación con las caídas de presión obtenidas para los tramos de tubería, la caída de presión en el lecho es mucho mayor, esta diferencia se puede apreciar en el Cuadro 5.8.

Cuadro 5.8. Caída de presión total en el secador y potencia del ventilador

Tramo de tubería	Caída de presión, ΔP / Pa
1	29.5
2	10.4
3	33.5
4	65.9
Lecho	171.4
ΔP Total	310.8

Para calcular la potencia necesaria en motor del ventilador se tiene que:

$$\varphi = \frac{\dot{v} * \Delta P_{Total}}{\eta} * 1.15 \quad 5.10$$

Donde:

\dot{v} : Flujo volumétrico del aire, m³/s

η : Eficiencia

Según McCabe, Smith y Harriot, 2007, la eficiencia de los ventiladores posee un valor aproximado de 70 %, y aplicando un factor de seguridad de 15 %, sobre la potencia del ventilador se obtuvo que la potencia requerida en este es de 0.307 k, lo que equivale a 0.41 HP.

5.4) Expansión térmica del material

Para el dimensionamiento adecuado del secador se consideró la expansión térmica del material, en este caso del acero inoxidable 304, ya que es el que se trabaja comercialmente para este tipo de secadores, se utilizó la siguiente fórmula:

$$L = L_0(1 + \alpha'\Delta T) \quad 5.11$$

L : Longitud final del material, m

L_0 : Longitud inicial del material, m

α' : coeficiente de expansión térmica lineal del material, m/m*K

ΔT : cambio de temperatura del material, K

El α para el acero inoxidable 304 es de 1.73×10^{-5} m/m*K, se tomó un ΔT de 35 °C, más un extra de 10 °C, contemplando posibles fluctuaciones en la temperatura interna del secador. En el Cuadro 5.9 se presentan las variaciones en la longitud de la bandeja.

Cuadro 5.9. Expansión térmica lineal de la bandeja.

Expansión	Longitud inicial, L_0 / m	Longitud final, L / m
Frontal	0.5000	0.5004
Lateral	0.6000	0.6005

Como se aprecia, la fluctuación en la longitud es baja, casi despreciable, pero no se debe dejar de lado.

CAPÍTULO 6. DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR Y DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO

En esta sección se discuten las medidas del secador para BSG, una vez que se realizaron los cálculos de requerimientos de aire y de temperatura, tomando en cuenta la disponibilidad en el mercado de sistemas de ventilación y calentamiento, así como especificaciones de los fabricantes en cuanto a materiales y grosores necesarios para el buen soporte estructural y condiciones inocuas del secador.

6.1) Dimensionamiento del secador

En la Figura 6.1 se muestra la vista principal del secador, donde el recorrido del aire comienza en la parte superior derecha del mismo. El ventilador cuenta con secciones rectangulares o cuadradas en todo su diseño, como se puede notar en las vistas subsiguientes del mismo. La entrada del aire se da por una sección de 15 cm de alto y 30 cm de ancho (Ver Figura 6.4), posteriormente se expande a una sección de 30 cm x 30 cm, impulsado por un ventilador que, como se calculó en la sección anterior, se ha dimensionado con una potencia de 0.307 kW.

El aire luego se calienta por medio de resistencias eléctricas, cuya potencia en conjunto suma 22.6 kW, para llegar a una temperatura de diseño de 60 °C, este aire caliente entra de forma vertical y a través de un lecho de 28 bandejas, distribuidas en dos columnas de 14 bandejas cada una. A esta cámara el aire llega luego de pasar por una expansión de 1 m de altura, que logra que el aire se distribuya uniformemente en el lecho.

Las bandejas tienen un área de secado de 0.5 m x 0.6 m cada una, más los bordes y espacios adecuados para la expansión térmica de metal, soporte y deslizamiento de las bandejas en el secador, que en total suman 4 cm de más. Estas dimensiones, más una división central de 3 cm, que sirve de soporte para las bandejas, dan a la cámara principal una longitud total de 1,070 m en el frente, y 0.605 m de profundidad, como se observa en la Figura 6.2 y Figura 6.4.

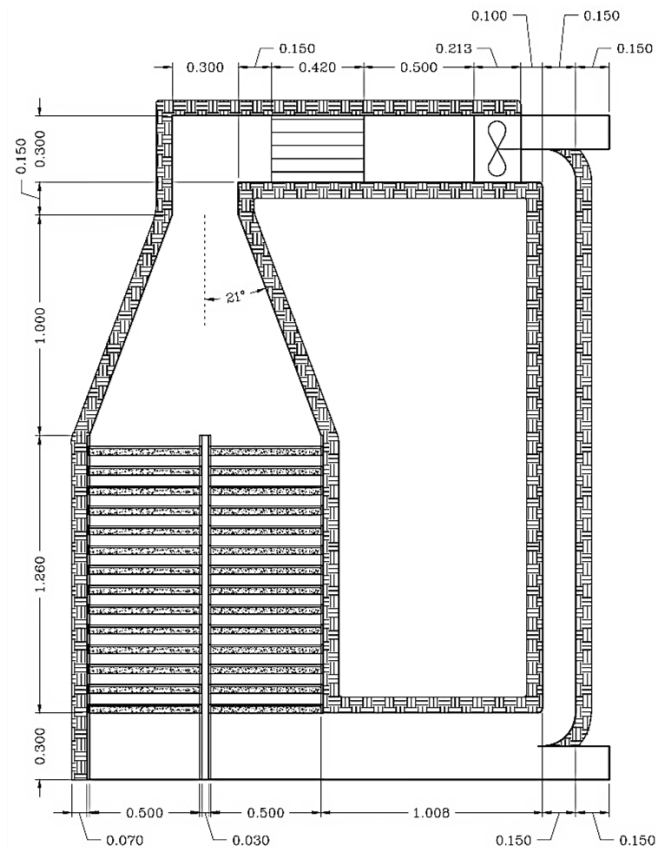


Figura 6.1. Vista frontal del secador y sus dimensiones
(Elaborado por Dania Cisneros Arias, 2018)

Estas dimensiones no toman en cuenta el borde de la pared del secador, cuyo espesor recomendado según los fabricantes es el calibre 16 a 20 (1.6 mm a 1 mm), por cuestiones de soporte y costos. Además, con el fin de que el aire atraviese las

bandejas, pero el material no, el tamaño máximo de malla es de 10 US Mesh (aproximadamente 2 mm). Estas bandejas se cargan con 4.5 kg cada una, formando lechos de 3 cm de alto (valor obtenido según el diseño de experimentos) con una altura total de bandeja de 4 cm. El secador se diseñó con un sobre dimensionamiento del 10 % sobre capacidad de material a secar.

El aire en la cámara principal tiene una velocidad de 1 m/s, según Couper, Penney, Fair, y Walas (2012) es adecuado considerar una recirculación del aire del 50 %. El análisis factorial del diseño arrojó tres posibles juegos de variables a utilizar, como se explicó en la sección de análisis del diseño factorial, pero para los propósitos de este secador se escogen las dos opciones que permiten utilizar un espesor de 0.030 m, ya que esto implica una menor cantidad de bandejas y una disminución por lo tanto en el tamaño del mismo.

Al finalizar el trayecto a través del lecho de secado, la cámara principal se extiende 30 cm más, con el fin de que el aire realmente pase totalmente a través del sólido. Luego esta desemboca en una segunda sección de 30 cm x 30 cm, hecho que se aprecia en la vista lateral derecha, en la Figura 6.2 y Figura 6.3. En esta última se puede ver también la entrada y salida del aire al secador, ambas secciones de 30 cm de ancho y 15 cm de altura.

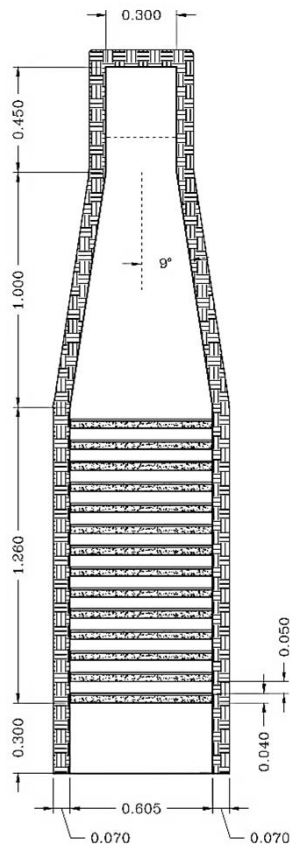


Figura 6.2. Vista lateral izquierda del secador y sus dimensiones
(Elaborado por Dania Cisneros Arias, 2018)

El material de construcción recomendado es acero inoxidable 304, así como un aislante de lana de vidrio, de 7 cm de espesor, aunque también puede reducirse a dos pulgadas (aproximadamente 5 cm), este criterio se establece por las ofertas que se encuentran en el mercado para grosores de este aislante, así mismo debida recomendación del fabricante del secador.

En la Figura 6.5, se muestra en detalle la construcción de las bandejas y su montaje para el secador. Según la literatura se seleccionó la distancia de 4 cm para la altura de la bandeja, con una distanciada entre ellas de 5 cm (Couper, Penney, Fair, y Walas, 2012). Aunque las bandejas tengan la altura de 4 cm, cabe mencionar que se

llenarán hasta 3 cm, el centímetro extra se considera para evitar que el material se caiga debido al movimiento y manipulación normal de las bandejas.

Cabe destacar que las dimensiones de las bandejas se realizaron con base en una serie de consideraciones importantes, primero se considera el espacio disponible para trabajar en la planta, segundo y más importante, según el consumo energético que se calculó en el capítulo anterior trabajar con un área de bandeja de 0.6 m^2 conlleva a optimizar la velocidad de transferencia de calor a un valor de 22.6 kW, ya que al aumentar el área de las bandejas, el consumo en kilowatts aumentaría; por ejemplo trabajar con un área de bandeja de 0.7 m^2 , aumenta el consumo energético hasta 26.4 kW (este valor se obtuvo realizando el mismo procedimiento del capítulo anterior, pero variando el área de la bandeja), por lo que se escogió el valor más bajo en cuanto a la relación consumo energético-área total de las bandejas. Estas últimas se separaron en dimensiones de $0.6 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, con el fin de construir una bandeja que sea de dimensiones manejables para un operario.

El número de bandejas necesario se determinó con base en la relación de sólido húmedo vs área de la bandeja ($14.36 \text{ kg}/\text{m}^2$) si se mantiene un espesor de 0.03 m, esta relación se obtuvo experimentalmente. Según el balance de masa, es necesario acomodar 101.14 kg de material húmedo, que se obtienen posterior al prensado, por lo que se requiere un área para las bandejas de 7.04 m^2 aproximadamente, además se considera un factor de seguridad de 10 %, en la capacidad de las bandejas, por lo que el va trabajar con un área de 7.74 m^2 , esta área para mayor facilidad se redondea a 8 m^2 .

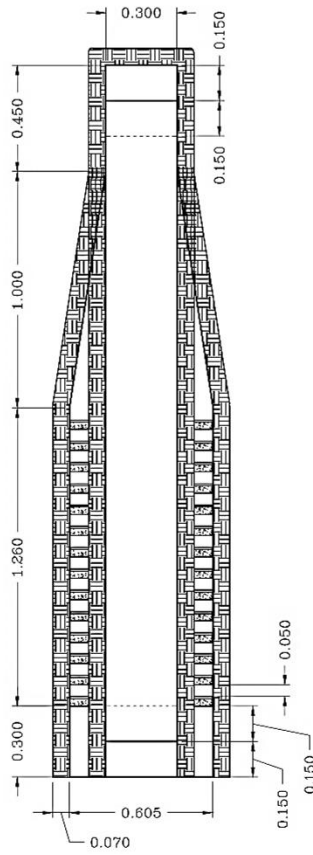


Figura 6.3. Vista lateral derecha del secador y sus dimensiones
(Elaborado por Dania Cisneros Arias, 2018)

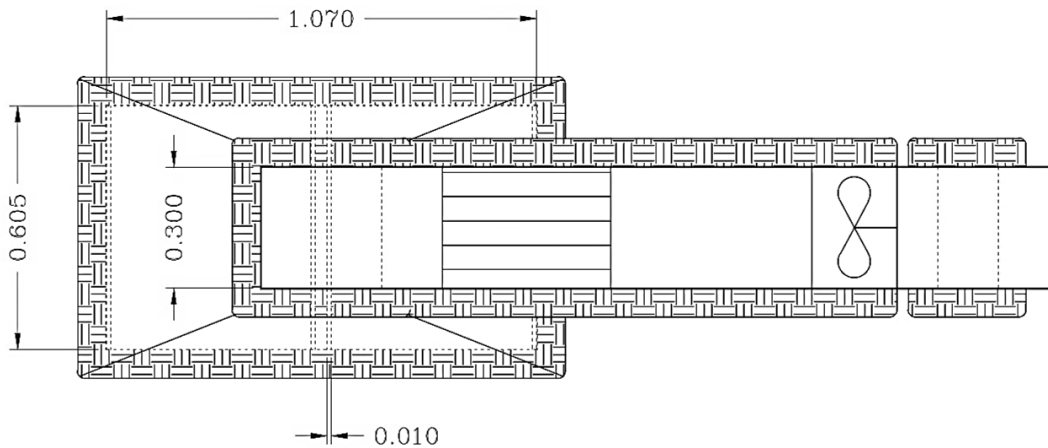


Figura 6.4. Vista superior del secador y sus dimensiones
(Elaborado por Dania Cisneros Arias, 2018)

Como se explicó anteriormente se tomó en cuenta la expansión térmica de material, por lo que se reservan 0.0025 m para este factor propiamente y 0.0075 m para el soporte de la bandeja, dando un total de 0.01 m para soportar a las mismas. Se tomó en consideración que las bandejas puedan entrar de manera holgada, este valor se contempla también en los 0.0025 m mencionados anteriormente.

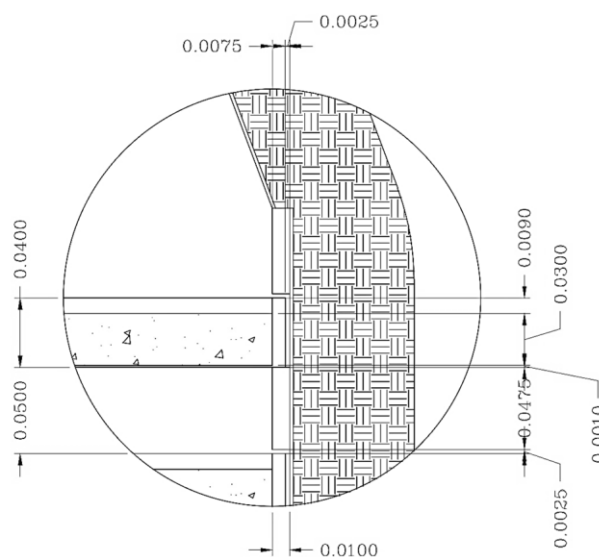


Figura 6.5. Detalle de las bandejas del secador y sus dimensiones (Elaborado por Dania Cisneros Arias, 2018)

6.2) Diagrama de flujo de proceso

El proceso de secado propuesto consta de:

- Prensado previo al secado sometido a una carga de 800 lb, lo que corresponde a 55.3 psi.
- Secado bajo las condiciones: temperatura del aire a 60 °C, velocidad del aire de 1.0 m/s y espesor de la cama de BSG de 3 cm.
- Almacenamiento en recipientes herméticos, para asegurar su conservación bajo el porcentaje de humedad del 10 %.

En cuanto a las necesidades de transporte, como se aprecia en la Figura 6.6, el secador se colocará estratégicamente al lado del proceso de cocción, para que posteriormente se saque de la marmita se pueda transportar por medio de un carrito (como se transporta actualmente el material) hasta el sistema de prensado. La prensa se va a colocar junto con el secador de manera que se pueda trabajar de forma conjunta y se puedan llenar las bandejas del secador al mismo tiempo que se prensa, lo que elimina la necesidad del transporte a largas distancias. Cabe destacar que el agua de prensa se debe almacenar en recipientes, con el fin de reincorporarla nuevamente al proceso de producción, o ser utilizada para alimentación animal.

La empresa cuenta ya con una sección de almacenaje de materia prima y producto terminado, que se encuentra cerca del secador, se plantea manejar el transporte por medio de carritos, lo que facilita en gran medida su manejo.

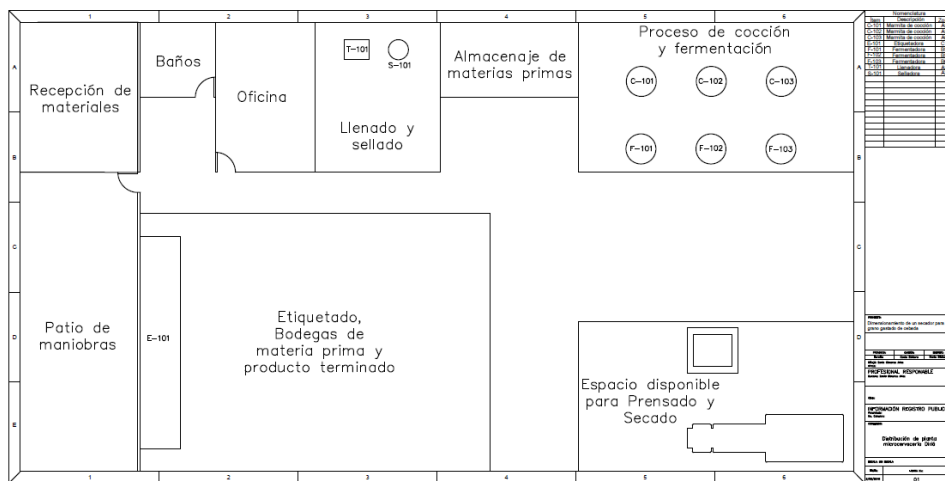


Figura 6.6. Distribución de planta incluyendo el sistema de secado en microcervecería Diríá.

(Elaborado por Dania Cisneros Arias, 2018)

El diagrama de flujo de proceso (DFP), se muestra a continuación:

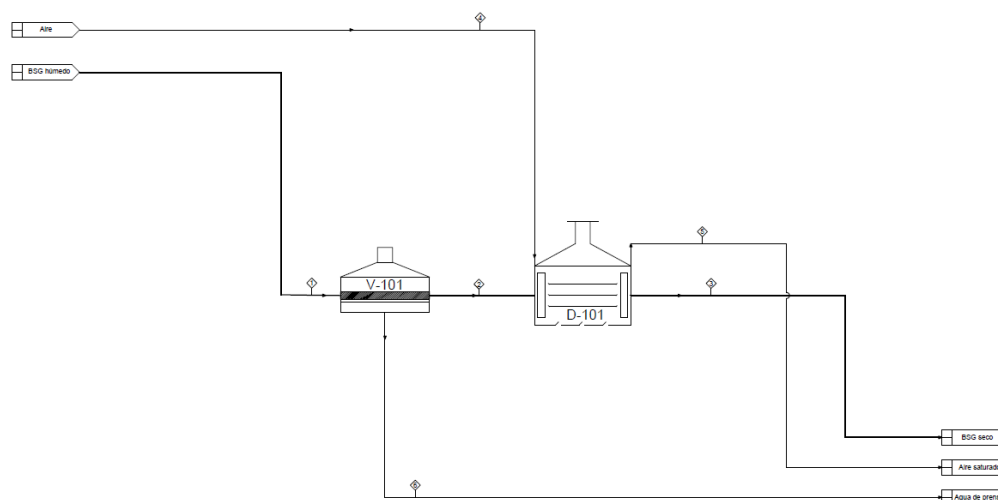


Figura 6.7. Vista previa del diagrama de flujo de proceso del sistema de secado propuesto para la micro cervecería Diríá.
(Elaborado por Dania Cisneros Arias, 2018)

En la sección de Anexos se puede encontrar de una manera más ampliada la distribución de planta actual y el diagrama de flujo de proceso, y los planos de cada vista del equipo, para una mejor apreciación.

CAPÍTULO 7. ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN

Este capítulo toma en consideración los costos totales de inversión para colocar el sistema de secado, también se plantea la alternativa para utilizar paneles solares como fuente de energía alternativa, según la solicitud de la empresa.

Cuando se realiza una inversión inicial es de importancia no dejar por fuera aspectos como transporte e instalación de los equipos, entre otros rubros importantes. Según Peters y Timmerhaus (1991), se pueden considerar los costos de instalación del equipo, tuberías instaladas y electricidad instalada de la literatura como se muestra en el Cuadro 7.1.

Cuadro 7.1. Valores teóricos por concepto de montaje e instalación para poner en marcha el secador.

Equipo	Rango de porcentaje sobre el costo del equipo (%)
Costo de instalación	25-55
Electricidad instalada	10-40
Tuberías instaladas	10-80

De estos rangos se trabajan con los límites inferiores, debido a que el equipo no es de grandes dimensiones, ni son de alta complejidad. Para el rubro de transporte se estiman aproximadamente 1 218 540 colones (US\$2000), para los tres equipos. (Mora, 2019)

El Cuadro 7.2, muestra un resumen del costo de inversión inicial que se debe realizar para poner en funcionamiento el sistema de secado. Las cotizaciones se realizaron a diversas empresas a nivel nacional. El secador se cotizó con la empresa OVENTEC, según los planos y dimensiones mostradas del diseño realizado. Las bandejas que llevará el secador se cotizaron con la empresa TAINEA, mientras que

la prensa hidráulica se cotizó con la empresa Soluciones Industriales F&M. En los anexos se pueden encontrar las cotizaciones de dichos equipos.

Cuadro 7.2. Costos de inversión iniciales del sistema de secado.

Equipo	Secador	Prensa hidráulica	Bandejas del secador
Costo del equipo (CRC)	¢ 5 270 000	¢ 1 380 000	¢ 1 752 000
Costo de instalación (CRC)	¢ 1 317 500	¢ 345 000	¢ 438 000
Impuesto de ventas (CRC)	¢ 685 100	-	¢ 175 200
Tuberías instaladas (CRC)	¢ 527 000	-	-
Electricidad instalada (CRC)	¢ 527 000	-	-
Costo de transporte (CRC)		¢ 1 218 540	
Total de la inversión (CRC)		¢ 13 687 900	

Como se aprecia la inversión inicial es de ¢ 13 687 900 colones. Los requerimientos auxiliares necesarios son por concepto de utilización de energía eléctrica para el adecuado funcionamiento del secador, como se aprecia en el Cuadro 7.3. Para este cálculo se considera que la empresa operará el equipo aproximadamente 6 h, 6 días por semana, se trabajaron con la tarifa de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) establecidas para una tarifa industrial, con un consumo mayor a 3 000 kWh por mes. El detalle de estos cálculos se presenta en la sección de muestra de cálculo, apéndice C (Compañía Nacional de Fuerza y Luz, 2018).

Cuadro 7.3. Costo eléctrico en colones para el funcionamiento del secador.

Potencia de las resistencias, P_r / kW	Potencia del ventilador, P_v / kW	Potencia total, P_T / kW	Consumo eléctrico, C_{ne} / (kWh/mes)	Costo eléctrico, C_{te} / (CRC/mes)
22.6	0.307	22.906	3 570.7	229 309.1

Es deseo de la empresa instalar paneles solares, por lo cual se cotizó la inversión de la colocación de dichos paneles, para lo cual se contactó con la empresa ENERTIVA, el Cuadro 7.4, muestra un resumen de la información brindada, realizando el consumo de energía de igual manera considerando el tiempo de operación de 6 h por día, 6 días por semana.

Cuadro 7.4. Estimación de paneles solares para la producción de energía

Consumo eléctrico de los paneles / (kWh/mes)	Capacidad del panel solar / Wp	Generación del panel eléctrico / kWh	Cantidad de paneles necesarios	Costo de adquisición y montaje de los paneles / CRC*
3 570.7	335	35	103	24 370 800

*Aproximación de 40 000 USD al tipo de cambio del 22 de enero del 2019, Fuente: ENERTIVA (2019)

Como se aprecia el costo en inversión de los paneles solares es 1.78 veces del costo de la inversión de la adquisición del secador. Sin embargo, los paneles poseen una vida útil de 20 años aproximadamente, si se divide el costo total de instalación de los paneles entre el costo anual de operación utilizando energía suministrada por la CNFL, se aprecia que los paneles se pagarían solos en un aproximado de 8.5 años, por lo que la empresa dejaría de tener egresos a partir de mediados de su octavo año, en cuanto a gastos energéticos se refiere.

Cuadro 7.5. Comparación económica del uso de paneles solares vs electricidad de la CNFL.

Gasto por año con la CNFL, debido a consumo eléctrico / CRC	Inversión en paneles solares / CRC	Cantidad de tiempo en que se iguala inversión / años
2 751 709	24 370 800	8.5

El tamaño de los paneles solares es de dimensiones aproximadas de 2 m², por lo que se requieren de 240 m², para colocar todos los paneles, estos se colocarían en el techo de la empresa para poder abarcar el área requerida (ENERTIVA, 2019).

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La empresa cuenta con un espacio disponible máximo para la colocación del secador de 2.40 m de ancho y 3.30 m de largo para un área total de 7.92 m². El residuo valorizable se genera durante la filtración del mosto en el proceso de producción cervecero.
- La empresa genera 130 kg/día de desechos húmedos, de los que se podrían obtener 45.2 kg/día de material con una humedad de 7 %.
- El porcentaje de humedad inicial de los residuos generados en la micro cervecería varió entre 60 % y 70 % de humedad en base húmeda aproximadamente, esto para cuatro distintos lotes analizados.
- El diseño factorial 2³, junto con el cálculo energético arrojan como condiciones favorables para la operación de secado una velocidad del flujo de aire a 1 m/s, espesor de 0.03 m para la cama de granos y una temperatura del aire de 60 °C.
- El modelo generado por las curvas de secado no se considera apto de ser utilizado en el cálculo del tiempo de secado del equipo, ya que presenta una diferencia significativa del 50% aproximadamente, entre el tiempo calculado de manera teórica y el obtenido experimentalmente en el secador piloto del CITA.
- El modelo de absorción de agua en el BSG proyecta valores de absorción que concuerdan con la realidad. Para las muestras utilizadas en el laboratorio, según el modelo se proyectó un porcentaje de humedad final (posterior a la exposición de condiciones ambientales) de 14.5 %, para dichas muestras su

valor real de humedad fue 14.8 %. Lo que representa un porcentaje de error del 2 %, que se considera aceptable.

- El modelo de absorción de agua demuestra que el grano absorbe humedad si se deja a condiciones ambientales en Santa Bárbara de Heredia hasta aproximadamente 17.5 % en una semana.
- Dado que la producción actual no es muy grande (genera 130 kg/día de material a secar) y debido a las características del material a secar, el sistema de secado debe ser por lotes, como un secador de bandejas, o bien sistemas como el lecho fluidizado o secador rotatorio para lograr un secado más uniforme.
- Se elige un secado por lotes con flujo a través del sólido, con flujo de aire descendente ya que se logran tiempos de secado menores y de esta manera el grano no es arrastrado por la corriente de aire caliente.
- En el diagrama de flujo de proceso se plantea el sistema de secado propuesto, compuesto por una prensa hidráulica y un secador batch de bandeja.
- La inversión inicial total del secador es de 13 687 900 colones, este secador tendrá un gasto económico de operación de 229 310 colones por mes, si se utiliza energía del suministro público.
- El costo de instalar un sistema de suministro de energía solar es de 24 370 800 colones, lo que es 1.78 veces más que el costo de secador. Sin embargo, el sistema de paneles compensa su adquisición a los 8.5 años de operación, por lo que la empresa gozaría de 11.5 años en los cuales no tendrían gastos por consumo eléctrico.
- Las dimensiones de la cámara de secado son de 0.605 m de ancho x 1.070 m de largo. La altura de dicha cámara es de 1.26 m, en el interior de la misma se distribuyen 28 bandejas divididas en dos columnas de 14, cada bandeja

con dimensiones de 0.5 x 0.6 m. La suma de las resistencias es de 22.6 kW en total, mientras que la potencia del ventilador es de 0.41 HP. El tiempo total de secado es de aproximadamente 6 h.

- Se plantea una recirculación del 50 % del aire, según la literatura, para aprovechar el calor del aire que no se ha saturado y disminuir el costo de calentamiento.

Recomendaciones

- Realizar un análisis a los granos de BSG una vez finalizado el proceso de secado, con el fin de conocer su valor nutricional con exactitud y así dar un adecuado uso este material valorizable como subproducto.
- Almacenar el grano en recipientes herméticos, de modo que no absorban humedad nuevamente y se pueda conservar en óptimas condiciones.
- Probar otros métodos de remoción de agua previo al secado, como lo es la centrifugación, esto evita la destrucción del grano, como ocurre en el prensado mecánico. Y evaluar si el costo eléctrico es beneficioso con respecto a la disminución de humedad.
- Analizar las posibilidades (en cuanto espacio y disponibilidad) de instalar en la empresa un sistema que sea alimentado por gas, para dar pie a una reducción de los gastos.
- Desarrollar un proyecto por separado la viabilidad financiera de colocar paneles solares, de manera que se estudie la posibilidad de realizar un financiamiento para la adquisición de los mismos.

CAPÍTULO 9. NOMENCLATURA

Símbolo

Mayúsculas

A	Área para secado, m ²
A'	Área superficial de la partícula, m ²
A_p	Área de la partícula, m ²
A_{sT}	Área de sección transversal de la tubería, m ²
A_T	Área total expuesta, m ²
B	Coefficiente de proporcionalidad de fracción de avance, 1/h
C	Estadístico de Cochran, adim
C_h	Calor húmedo, kJ/kg de aire*K
C_p	Calor específico del gas, kJ/kg*K
C_{ne}	Consumo eléctrico, kWh/mes
C_{te}	Costo eléctrico, CRC/mes
D_e	Diámetro equivalente de la tubería, m
D_{ep}	Diámetro equivalente de la partícula, m
D_p	Diámetro de partícula, m
E	Consumo energético, kW
E_p	Fracción de extracción de líquido por prensado, adimensional
K_c	Coefficiente de pérdidas por contracción, adimensional
K_e	Coefficiente de pérdidas por expansión, adimensional
K_f	Coefficiente de pérdidas por accesorios, adimensional
L	Longitud de tubería o longitud final de material, m
L_0	Longitud inicial de material, m
L_r	Líquido removido, mL
M	Masa molar del aire, kg/kgmol
P	Presión, atm, psi
P_p	Perímetro de la partícula, m
P_r	Potencia de las resistencias, kW
P_T	Potencia total, kW
P_v	Potencia del ventilador, kW
Pr	Número de Prandtl, adimensional
P_t	Perímetro de tubería en contacto con el fluido, m
Q	Calor transferido a los granos, kJ
R	Constante de los gases ideales, m ³ *atm/kgmol*K

R'	Velocidad de secado, $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$
Re	Número de Reynolds, adimensional
T	Temperatura, $^{\circ}\text{C}$
W	Carga aplicada, lb
W_p	Trabajo mecánico, J
X	Fracción de humedad en base seca, adimensional
Y'	Humedad absoluta del aire, $\text{kg agua}/\text{kg aire seco}$

Minúsculas

a	Coefficiente del modelo cinético de absorción, kg/h
a'	Valor de proporcionalidad, $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$
a_w	Actividad de agua, adimensional
b	Coefficiente del modelo cinético de absorción, adimensional
f	Factor de fricción de Fanning, adimensional
g	Gravedad, m/s^2
h	Coefficiente de transferencia de calor, $\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ o Altura, m
h_f	Pérdidas por fricción totales, J/kg
h_p	Altura de partícula, m
k	Conductividad térmica, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
m	Masa, g, kg
\dot{m}	Velocidad másica del aire, kg/s , kg/h
m'_s	Masa de sólido seco por grano, kg
q	Coefficiente de transferencia de calor, KW
r	Radio de partícula, m
s	Desviación estándar, variable
s_{max}	Desviación estándar máxima, variable
t	Tiempo, s, min, h
v	Velocidad del aire, m/s
\dot{v}	Flujo volumétrico del aire, m^3/s
x	Fracción de humedad en base húmeda, adimensional
x_a	Fracción de humedad posterior a la absorción, en base húmeda, adimensional
x_e	Fracción de humedad esperada luego del prensado, en base húmeda, adimensional
y	Fracción de avance de absorción, adimensional

**Letras
Griegas**

ΔT_L	Diferencia de temperatura logarítmica media, °C
Δm	Diferencial en masa de agua debido a la absorción, g, kg
ΔP	Caída de presión, Pa
Φ	Esfericidad de la partícula, adimensional
α	Coefficiente de corrección por energía cinética, adimensional
α'	Coefficiente de expansión térmica lineal del material, m/m*K
δ	Espesor de capa, m
ε	Porosidad del lecho, adimensional
λ	Calor latente de vaporización, kJ/kg
η	Eficiencia, adimensional
μ	Viscosidad, N*s/m ²
ρ	Densidad, kg/m ³
φ	Potencia del ventilador, kW

CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFÍA

- Abed, A. (2011). Design and construction of a solar drying system. *African Journal of Agricultural*, 343-351.
- Aboltins, A., & Palabinskis, J. (2015). Research in brewer's spent grain drying process. *Engineering for rural development*, 20-22.
- Arguedas, R. (10 de Diciembre de 2017). Historia y antecedentes de la microcervecería Diríá. (D. J. Cisneros, Entrevistador)
- AURI. (2009). *Template for Estimating County Level Energy Use and Renewable Energy Potential*. Agricultural Utilization Research Institute . Minnesota, Estados Unidos: 6Solutions LLC.
- BIOMIN Holding GmbH. (2018). *Mycotoxins.info*. Recuperado el 25 de abril de 2018, de Mycotoxin Formation/Fungal Growth: <http://www.mycotoxins.info/en/mycotoxins/mycotoxin-formation/>
- CARVER, INC. (2004). Operation, installation and maintenance Manual. Wabash, USA.
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 1412-1421.
- Compañía Nacional de Fuerza y Luz. (19 de Diciembre de 2018). *Tarifas eléctricas* . Obtenido de Compañía Nacional de Fuerza y Luz: https://www.cnfl.go.cr/documentos/direccion_comercializacion/resumen_tarifas.pdf
- Couper, J., Penney, W., Fair, J., & Walas, S. (2012). *Chemical Process Equipment: Selection and Design* (Tercera ed.). Estados Unidos: Elsevier.
- ENERTIVA. (22 de Enero de 2019). Cotización de paneles solares con la empresa ENERTIVA. (D. Cisneros, Entrevistador)

- Fernández, A. (2014). *Transformación de subproductos y residuos de agroindustria de cultivos templados, subtropicales y tropicales en la carne y leche bovina*. Buenos Aires: INTA.
- Finley, J., Walkera, C., & Hautal, E. (1976). Utilisation of Press Water from Brewer's Spent Grains. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 655-660.
- Fito, P., Andrés, A. M., Barat, J. M., & Albors, A. M. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. España: Universitat Politècnica de València.
- Gallardo, M. (26 de Setiembre de 2012). *Concentrados y subproductos para la alimentación de rumiantes*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2016, de Universidad de la República-Uruguay. Departamento de Producción Animal y Pasturas: <http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos/NUTRICION/TEORICOS/Tema%202.%20Material%20de%20lectura.%20Concentrados%20y%20subproductos.pdf>
- Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de Transportes y Principios de Procesos de Separación (Incluye Operaciones Unitarias)*. México: Compañía Editorial Continental.
- Gómez, J. (Abril de 2008). Ingeniería Verde: Doce principios para la Sostenibilidad. *Ingeniería Química*(458), 168-175.
- Guerra, W. (2012). *Evaluación de las características físico-químicas del concentrado de vaca lechera a lechera a base de afrecho de malta de cebada*. Zamorano, Honduras: Departamento de Agroindustria Alimentaria.
- Gupta, M., Abu-Ghannam, N., & Gallagher, E. (2010). Barley for Brewing: Characteristic Changes during Malting, Brewin and Applications of its By-Products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, 318-328.
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2006). *Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de precisión - Parte 2: método básico para la determinación de la repetibilidad y reproducibilidad de un método de medición normalizado*. San Pedro de Montes de Oca: INTECO.

- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (15 de Enero de 2018). *Datos climáticos*. Obtenido de Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica : <https://www.imn.ac.cr/inicio>
- Kissell, L., & Prentice, N. (1979). Protein and Fiber Enrichment of Cookie Flour with Brewer's Spent Grain. *Cereal Chemistry*, 261-266.
- Krasauskas, A. (2017). Fungi in malting barley grain and malt production. *Biologija*, 63(3), 283-288.
- Madhlopa, A., & Ngwalo, G. (2007). Solar dryer with thermal storage and biomass backup heater. *Solar Energy*, 81(4), 449-492.
- Mallen, E., & Najdanovic-Visac, B. (2018). Brewers' spent grains: Drying kinetics and biodiesel production. *Bioresource Technology Reports*, 16-23.
- Marcilla, A. (1999). *Introducción a las operaciones de separación contacto continuo*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Martínez, L., Kharissova, O., & Kharisov, B. (2018). *Handbook of Ecomaterials*. Switzerland: Springer.
- Mata, J. (25 de Agosto de 2018). Desarrollo y análisis de curvas de absorción de agua en biomasas (cebada malteada). (D. Cisneros, Entrevistador)
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Mora, A. (2014). *Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha de un sistema de secado de granos de café con uso de colectores solares*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Mora, R. (Enero de 2019). Estimaciones de transporte e instalación de equipos industriales a nivel nacional. (D. Cisneros, Entrevistador)
- Mujumdar, A. (2015). *Handbook of Industrial Drying* (4ta ed.). Boca Ratón, Florida: CRC Press.

- Mujumdar, A., & Jangam, S. (2011). *Energy Issues and Use of Renewable Source of Energy for Drying of Foods*. Bangkok: National University of Singapore.
- Mussatto, S., Dragone, G., & Roberto, I. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 1-14.
- Mussatto, S., Moncada, J., Roberto, I., & Cardona, C. (2013). Techno-economic analysis for brewer's spent grains use on a biorefinery concept: The Brazilian case. *Bioresource Technology*, 302-310.
- Nandwani, S. (2013). *Secadores solares en Costa Rica-Experiencia personal*. Heredia: Universidad Nacional.
- OVENTEC. (14 de Enero de 2019). Diseño y cotización de un secador para BSG. (D. Cisneros, Entrevistador)
- P&K, E. (2018). *EMLab P&K*. Recuperado el 25 de abril de 2018, de Resources/Fungal Library: <https://www.emlab.com/resources/fungal-library/mucor-sp/>
- Perry, R., & Green, D. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (7ma ed.). Chicago: McGraw-Hill.
- Peters, M., & Timmerhaus, K. (1991). Estimation of capital investment cost (showing individual components). En M. Peters, & K. Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (pág. 209). Singapore: McGraw-Hill Book.
- Petruccioli, M., Raviv, M., Di Silvestro, R., & Dine, G. (2011). Agriculture and Agro-Industrial Wastes, Byproducts, and Wastewaters: Origin, Characteristics, and Potential in Bio-Based-Compounds Production. En M. Moo-Young, *Comprehensive Biotechnology* (págs. 531-545). Newnes.
- Pitt, J., & Hocking, A. (2009). *Fungi and Food Spoilage* (3ra ed.). New York: Springer.
- Roos, C. (2013). *Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power*. Estados Unidos: U.S. Department of Energy.

- Sadh, P., Duhan, S., & Duhan, J. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), 1-15.
- Sana, I., LianYan, H., Huijuan, Z., Jing, W., & Meng, Y. (2017). Composition and Nutrient Value Proposition of Brewers Spent Grain. *Journal of Food Science*, 2232-2242.
- Sancho, R. (2015). *Diseño de una micro-planta de fabricación y estudios de técnicas y procesos de producción*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Santosa, M., Jiménez, J., Bartolome, B., Gómez, C., & del Nozal, M. (2002). Variability of brewer's spent grain within a brewery. *Food Chemistry*, 17-21.
- Thompson, E. (20 de Octubre de 2017). Condiciones de operación de la prensa hidráulica del Laboratorio de Química de Alimentos de la escuela de Tecnología de Alimentos en la Universidad de Costa Rica. (D. Cisneros, Entrevistador)
- Treybal, R. (1988). *Operaciones de Transferencia de Masa* (Segunda ed.). México DF: McGraw-Hill.
- Vian, Á., & Ocón, J. (1976). *Elementos de Ingeniería Química*. Madrid: Aguilar S.A.
- Vieira, E., Rocha, A., Coelho, E., Pinho, O., Saraiva, J., Ferreira, I., & Coimbra, M. (2013). Valuation of brewer's spent grain using a fully recyclable integrated process for extraction of proteins and arabinoxylans. *Industrial Crops and Products*, 136-143.
- Yusuf, M. (2017). Agro-Industrial Waste Materials and their Recycled Value-Added Applications: Review. En L. Martínez, O. Kharissova, & B. Kharisov, *Handbook of Ecomaterials*. Switzerland: Springer.

CAPÍTULO 11. APÉNDICES

APÉNDICE A. DATOS EXPERIMENTALES

A.1. Datos obtenidos para la determinación de humedad en las muestras:

Cuadro 11.1. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, sin tratamiento previo de prensado, lote I.

Muestra	Masa de cápsula + tapa, m/g	Masa de la cápsula + muestra, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 2 h, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 3 h, m/g
1	20.4219	22.4234	20.9197	20.9170
2	21.0572	23.0546	21.5519	21.5508
3	20.6968	22.6919	21.2202	21.2193

Cuadro 11.2. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, sin tratamiento previo de prensado lote de trabajo para usar en el secador.

Muestra	Masa de cápsula + tapa, m/g	Masa de la cápsula + muestra, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 2 h, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 3 h, m/g
1	20.5947	22.5917	21.3314	21.3284
2	20.7184	22.7127	21.4614	21.4614
3	20.4276	22.4251	21.1790	21.1790

Cuadro 11.3. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posteriormente de aplicar una carga manual de 110 lb.

Muestra	Masa de cápsula + tapa, m/g	Masa de la cápsula + muestra, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 2 h, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 3 h, m/g
1	20.5202	22.5274	21.2952	21.2925
2	20.6342	22.6332	21.4219	21.4208
3	21.1158	23.1137	21.8990	21.8977

Cuadro 11.4. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posteriormente de aplicar una carga mecánica de 800 lb.

Muestra	Masa de cápsula + tapa, m/g	Masa de la cápsula + muestra, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 2 h, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 3 h, m/g
1	20.0172	22.0117	20.8436	20.8433

Cuadro 11.4 (Continuación). Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posteriormente de aplicar una carga mecánica de 800 lb.

Muestra	Masa de cápsula + tapa, m/g	Masa de la cápsula + muestra, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 2 h, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 3 h, m/g
2	20.8102	22.8128	21.6412	21.6387
3	20.5104	22.5136	21.3538	21.3521

A.2. Datos obtenidos para la extracción de líquido en muestras de 600 g de grano gastado de cebada de manera manual y mecánica según corresponda:

Cuadro 11.5. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga manual (110 lb).

Muestra	Masa del equipo + muestra, m/g	Masa del equipo + muestra después del prensado, m/g	Masa de líquido extraído, m/g
1	2869.0	2833.5	35.5
2	2869.5	2826.5	43.0
3	2869.5	2838.5	31.0

Cuadro 11.6. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 200 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, m/g	Masa del equipo + muestra después del prensado, m/g	Masa de líquido extraído, m/g
1	2869.5	2809.0	60.5
2	2869.5	2801.0	68.5
3	2869.5	2811.0	58.5

Cuadro 11.7. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 400 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, m/g	Masa del equipo + muestra después del prensado, m/g	Masa de líquido extraído, m/g
1	2869.5	2745.5	124.0
2	2869.5	2741.5	128.0
3	2869.5	2755.5	114.0

Cuadro 11.8. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 600 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, <i>m/g</i>	Masa del equipo + muestra después del prensado, <i>m/g</i>	Masa de líquido extraído, <i>m/g</i>
1	2870.0	2726.0	144.0
2	2871.0	2741.5	129.5
3	2867.5	2716.5	151.0

Cuadro 11.9. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 800 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, <i>m/g</i>	Masa del equipo + muestra después del prensado, <i>m/g</i>	Masa de líquido extraído, <i>m/g</i>
1	2870.0	2614.0	256.0
2	2870.0	2596.5	273.5
3	2870.0	2615.0	255.0

Cuadro 11.10. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1000 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, <i>m/g</i>	Masa del equipo + muestra después del prensado, <i>m/g</i>	Masa de líquido extraído, <i>m/g</i>
1	2868.0	2596.5	271.5
2	2870.0	2614.0	256.0
3	2870.0	2608.5	261.5

Cuadro 11.11. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1200 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, <i>m/g</i>	Masa del equipo + muestra después del prensado, <i>m/g</i>	Masa de líquido extraído, <i>m/g</i>
1	2870.0	2605.0	265.0
2	2870.0	2607.5	262.5
3	2870.0	2604.0	266.0

Cuadro 11.12. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1400 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, <i>m/g</i>	Masa del equipo + muestra después del prensado, <i>m/g</i>	Masa de líquido extraído, <i>m/g</i>
1	2870.0	2605.5	264.5
2	2870.0	2611.5	258.5
3	2870.0	2596.5	273.5

Cuadro 11.13. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1600 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, m/g	Masa del equipo + muestra después del prensado, m/g	Masa de líquido extraído, m/g
1	2870.0	2607.0	263.0
2	2870.0	2598.0	272.0
3	2870.0	2602.5	267.5

Cuadro 11.14. Extracción de líquido a una masa de 600 g de BSG cuando se aplica una carga de 1800 lb utilizando una prensa hidráulica.

Muestra	Masa del equipo + muestra, m/g	Masa del equipo + muestra después del prensado, m/g	Masa de líquido extraído, m/g
1	2870.0	2608.5	261.5
2	2870.0	2583.0	287.0
3	2870.0	2605.0	265.0

A.3. Desarrollo del diseño factorial 2³, de las muestras prensadas bajo cargas manual y mecánica

Cuadro 11.15. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 1 y 9 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).

Tiempo, t/min	Masa medida, m/g	Tiempo, t/min	Masa medida, m/g
<i>Corrida 1</i>		<i>Corrida 9</i>	
0	303.70	0	286.7
2	260.00	2	252.6
4	231.10	5	227.9
6	213.30	7	211.6
8	201.40	9	199.3
10	187.90	11	189.1
12	179.60	13	181
14	173.60	15	174
16	167.70	17	168.8
19	161.90	19	163.3
21	158.10	21	160.6
23	154.80	26	154
25	152.90	30	153.7
29	150.90	38	143.2
37	147.30	46	139
45	145.20	54	135.1

Cuadro 11.15. (Continuación). Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 1 y 9 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).

Tiempo, <i>t</i> / min	Masa medida, <i>m</i> / g	Tiempo, <i>t</i> / min	Masa medida, <i>m</i> / g
<i>Corrida 1</i>		<i>Corrida 9</i>	
61	140.00	62	133.7
77	139.20	78	132.7
109	136.50	-	-
139	134.80	-	-

Cuadro 11.16. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 2 y 10 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).

Tiempo, <i>t</i> / min	Masa medida, <i>m</i> / g	Tiempo, <i>t</i> / min	Masa medida, <i>m</i> / g
<i>Corrida 2</i>		<i>Corrida 10</i>	
0	296.9	0	284.9
2	254.8	3	243.7
4	224.8	5	215.4
6	201.3	7	193.2
8	184.5	9	177.1
10	173.2	11	165.7
12	165.3	13	156.9
15	156.1	15	149.7
17	150	17	143.1
21	142.6	19	138.9
25	138.1	21	134.7
29	138	25	128.3
36.7	133.5	28	126.6
38	132.7	30	125.4
40	127.5	34	123.1
42	128.2	42	120.4
46	127	50	119.7
54	125.7	66	117.7
70	124.1	-	-

Cuadro 11.17. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 3 y 11 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).

Tiempo, <i>t</i> / min	Masa medida, <i>m</i> / g	Tiempo, <i>t</i> / min	Masa medida, <i>m</i> / g
<i>Corrida 3</i>		<i>Corrida 11</i>	
0	595.3	0	595.0

Cuadro 11.17. (Continuación). Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 3 y 11 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 3</i>		<i>Corrida 11</i>	
2	543.0	2	535.8
4	493.3	4	485.6
6	453.7	6	447.7
8	421.7	9	416.0
10	397.5	11	390.5
12	376.0	13	371.4
14	359.6	15	352.1
16	345.4	17	338.8
18	337.1	19	326.8
21	324.7	21	319.0
25	309.8	23	310.4
29	300.9	25	305.0
33	291.8	29	291.6
37	287.1	34	285.1
45	279.2	38	279.4
53	276.6	46	273.6
69	271.4	54	268.4
101	267.6	70	265.1
165	266.2	102	261.1
-	-	166	259.1

Cuadro 11.18. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 4 y 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 4</i>		<i>Corrida 12</i>	
0	599.6	0	594.8
2	539.6	2	535.8
4	477.0	4	476.8
6	430.5	8	401.5
8	393.3	12	354.7
10	361.3	17	324.1
12	346.5	21	304.7
14	326.2	25	291.6
17	314.4	29	282.9
19	306.2	33	277.3
21	293.6	41	271.4

Cuadro 11.18. (Continuación). Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 4 y 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 4</i>		<i>Corrida 12</i>	
23	286.7	49	266.1
25	285.3	65	264.5
29	275.4	97	263.0
33	274.5	-	-
42	272.0	-	-
58	268.5	-	-
74	265.0	-	-

Cuadro 11.19. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 5 y 13 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 5</i>		<i>Corrida 13</i>	
0	278.1	0	289.70
2	241.9	2	244.80
4	216.9	4	220.70
6	201.1	6	201.20
8	189.3	8	187.40
10	177.8	10	174.90
12	169.6	12	165.20
15	165.2	14	159.40
17	159.1	16	155.30
19	153.9	19	151.70
21	151.9	21	147.40
25	147.9	23	144.80
29	142.3	27	139.10
33	140.7	28.7	137.74
34.8	139.6	31	135.90
41	135.8	35	133.90
49	133.8	43	133.00
66	130.8	59	128.30
82	130.7	75	128.00
114	129.8	-	-

Cuadro 11.20. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 6 y 14 (T , v , δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 6</i>		<i>Corrida 14</i>	
0	293.0	0	296.9
0.5	275.5	2	237.9
2	230.3	4	204.1
4	182.4	7	182.7
6	159.0	9	167.3
8	148.5	11	156.9
10	143.0	13	149.1
12	137.4	15	143.7
15	134.4	17	139.5
17	131.9	19	135.7
21	128.0	21	133.5
25	126.4	25	130.7
33	125.0	29	128.7
49	122.7	38	126.4
-	-	54	123.7

Cuadro 11.21. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 7 y 15 (T , v , δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.030 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 7</i>		<i>Corrida 15</i>	
0	595.0	0	600.8
2	545.0	2	542.9
4	483.6	4	487.2
6	439.6	6	442.4
8	404.4	9	406.1
10	376.8	11	377.1
12	359.9	13	353.4
15	344.3	15	335.5
17	333.2	17	321.7
19	322.4	19	309.5
21	314.5	21	300.0
23	308.3	23	292.5
27	296.6	25	285.0
31	290.1	27	282.0
35	281.5	30	277.6
39	277.6	34	271.8

Cuadro 11.21. (Continuación). Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 7 y 15 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.030 m).

Tiempo, t / min	Masa medida, m / g	Tiempo, t / min	Masa medida, m / g
<i>Corrida 7</i>		<i>Corrida 15</i>	
48	272.1	35.5	270.5
64	265.9	38	268.3
80	262.5	46	261.9
94	262.0	54	259.5
112	261.5	70	256.5
-	-	102	254.2
-	-	166	250.5
-	-	196	251.5

Cuadro 11.22. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual, corridas 8 y 16 (T, v, δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.030 m).

Tiempo, t / min	Masa medida, m / g	Tiempo, t / min	Masa medida, m / g
<i>Corrida 8</i>		<i>Corrida 16</i>	
0	597.0	0	596.90
2	522.4	2	525.40
4	443.9	4	466.40
6	397.2	6	424.00
8	366.6	8	394.00
10	343.4	11	364.30
12	331.6	13	344.40
14	318.5	15	328.40
17	305.8	21	310.10
19	299.3	24	298.00
21	294.5	26	291.60
25	284.9	27.7	284.97
26.8	280.8	28	283.80
29	275.7	30	283.30
33	273.9	34	276.30
41	270	38	271.90
57	268.4	46	268.40
90	261	62	265.00
-	-	95	265.00

Cuadro 11.23. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 1 y 9 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 1</i>		<i>Corrida 9</i>	
0	246.90	0	265.80
2	198.50	2	220.10
4	173.10	4	191.90
6	157.60	6	171.50
8	147.40	9	159.40
10	139.60	11	150.20
12	135.10	13	143.20
14	131.60	15	137.80
16	128.30	17	134.40
19	125.40	19	131.10
21	123.20	21	128.80
25	119.80	25	125.20
27.9	119.15	29	122.60
29	118.90	33	120.50
37	116.10	42	119.00
45	114.10	58	115.90
61	112.00	74	115.70
93	110.80	106	114.20
-	-	136	113.80

Cuadro 11.24. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 2 y 10 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 2</i>		<i>Corrida 10</i>	
0	260.4	0	264.60
2	203.1	2	213.00
4	174.4	4	183.30
7	158.1	7	166.50
9	147.1	9	157.70
11	140.1	11	145.40
13	138.4	13	142.30
17	129.8	15	137.80
21	125.0	17	133.50
22.4	124.4	19	131.30
25	123.3	23	127.20
33	119.4	26.7	125.91

Cuadro 11.24. (Continuación). Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 2 y 10 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.015 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 2</i>		<i>Corrida 10</i>	
41	119.3	27	125.80
57	117.1	36	124.90
90	115.7	52	119.30
-	-	68	118.20
-	-	100	117.70
-	-	132	117.20

Cuadro 11.25. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 3 y 11 (T, v, δ : 50 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 3</i>		<i>Corrida 11</i>	
0	546.2	0	515.6
0.5	541.5	2	457.6
2.5	476.2	4	404.8
4.5	427.1	6	366.5
6.5	390.1	8	337.8
8.5	363.3	10	316.1
10.5	342.8	13	301.5
12.5	327.3	15	288.3
15.5	315.1	17	283.2
17.5	305.3	21	266.9
19.5	297.8	25	254.6
21.5	291.6	29	249.4
23.5	286.1	31.4	245.31
27.5	278.2	33	242.5
31.5	273.0	37	243.3
35.5	269.6	46	236.1
39.5	266.1	54	232.4
47.5	261.3	70	232.3
63.5	256.6	102	228.1
96.5	255.2	-	-
160.5	250.6	-	-

Cuadro 11.26. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 4 y 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m).

Tiempo, <i>t</i> /min	Masa medida, <i>m</i> /g	Tiempo, <i>t</i> /min	Masa medida, <i>m</i> /g
<i>Corrida 4</i>		<i>Corrida 12</i>	
0	544.70	0	548.80
2	465.60	2	470.00
4	406.70	4	407.80
6	363.30	6	363.20
9	332.10	8	331.90
11	308.90	10	309.70
13	289.70	12	293.50
15	277.10	14	281.30
17	268.20	17	272.10
19	260.40	19	265.30
21	254.60	21	260.20
23	251.30	25	253.10
26	246.13	26.5	251.41
27	244.40	29	248.60
32	240.40	35	245.50
40	235.90	37	243.70
56	232.30	53	239.20
88	230.00	85	236.60
152	228.80	149	233.80
182	227.50	179	233.80
192	226.60	189	228.30

Cuadro 11.27. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 5 y 13 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).

Tiempo, <i>t</i> /min	Masa medida, <i>m</i> /g	Tiempo, <i>t</i> /min	Masa medida, <i>m</i> /g
<i>Corrida 5</i>		<i>Corrida 13</i>	
0	258.90	0	263.4
2	209.50	3	214.9
4	182.00	5	187.7
6	164.20	7	172.0
9	154.10	9	161.1
11	146.20	11	152.7
13	140.30	13	146.3
15	135.80	15	141.0
17	132.40	17	137.2
19	129.60	19	133.8

Cuadro 11.27. (Continuación) Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 5 y 13 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).

Tiempo, t / min	Masa medida, m / g	Tiempo, t / min	Masa medida, m / g
<i>Corrida 5</i>		<i>Corrida 13</i>	
21	129.40	21	130.8
25	125.80	24	128.9
27.6	124.63	28	125.6
29	124.00	30.6	124.0
37	120.20	32	123.1
46	118.90	40	120.6
62	118.60	48	118.9
94	115.90	64	117.3
-	-	96	115.3

Cuadro 11.28. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 6 y 14 (T, v, δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.015 m).

Tiempo, t / min	Masa medida, m / g	Tiempo, t / min	Masa medida, m / g
<i>Corrida 6</i>		<i>Corrida 14</i>	
0	263.00	0	265.00
3	201.20	2	203.50
5	169.90	4	174.50
7	152.10	6	159.50
9	141.20	8	149.50
11	133.40	10	143.30
13	128.00	12	138.70
15	124.30	14	133.70
17	122.10	16	130.80
21	118.60	18	128.80
25	116.80	23	126.20
34	114.50	27	123.70
50	112.20	35	122.10
66	111.00	51	120.10
98	110.00	83	117.30

Cuadro 11.29. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 7 y 15 (T, v, δ : 50 °C, 1.4 m/s, 0.030 m).

Tiempo, <i>t</i> /min	Masa medida, <i>m</i> /g	Tiempo, <i>t</i> /min	Masa medida, <i>m</i> /g
<i>Corrida 7</i>		<i>Corrida 15</i>	
0	543.8	0	544.30
2	471.4	2	470.50
4	412.0	5	411.40
6	371.2	7	368.90
8	340.7	9	341.00
11	319.7	11	321.70
13	302.1	15	302.30
15	290.7	17	292.20
17	281.3	19	284.30
19	274.5	21	278.40
21	268.3	23	273.90
23	263.2	27	266.70
27	257.3	31	263.60
30.1	254.4	32.9	261.94
31	253.6	39	256.60
39	246.7	47	252.80

Cuadro 11.30. Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 8 y 16 (T, v, δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.030 m)

Tiempo, <i>t</i> /min	Masa medida, <i>m</i> /g	Tiempo, <i>t</i> /min	Masa medida, <i>m</i> /g
<i>Corrida 8</i>		<i>Corrida 16</i>	
0	548.8	0	543.20
2	461.3	2	450.50
4	391.2	4	382.10
6	345.2	6	336.60
8	314.9	8	307.00
10	294.9	10	287.60
13	280.8	12	274.20
15	271.2	14	264.50
17	264.2	16	257.80
19	258.2	18	252.70
21	254.7	22.5	246.13
23.5	251.1	23	245.40
25	249.0	27	242.10

Cuadro 11.30. (Continuación), Datos de tiempo y masa para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado mecánico, corridas 8 y 16 (T, v, δ : 60 °C, 1.4 m/s, 0.030 m)

Tiempo, t /min	Masa medida, m /g	Tiempo, t /min	Masa medida, m /g
<i>Corrida 8</i>		<i>Corrida 16</i>	
29	245.0	35	237.70
37	241.8	51	233.80
53	237.9	83	231.50
85	235.6	147	229.20
150	233.5	157	228.90

Cuadro 11.31. Datos de tiempo y porcentaje de humedad cercano a 7 %, para las corridas de secado del diseño factorial, con pretratamiento de prensado manual y mecánico.

Número de corrida estándar	Tiempo, t /min	Porcentaje de humedad/%	Tiempo, t /min	Porcentaje de humedad/%
	<i>Corridas con prensado manual</i>		<i>Corridas con prensado mecánico</i>	
1	45.00	7.16	27.90	7.00
2	36.70	7.00	22.40	7.00
3	37.00	7.30	35.50	7.00
4	25.00	7.12	26.00	7.00
5	34.80	7.00	27.60	7.00
6	17.00	7.00	21.00	7.25
7	35.00	7.10	30.10	7.00
8	26.80	7.00	23.50	7.00
9	38.00	7.33	29.00	7.18
10	28.00	7.02	26.70	7.00
11	38.00	7.30	31.40	7.00
12	29.00	7.00	26.50	7.00
13	28.70	7.00	30.60	7.00
14	21.00	7.34	23.00	7.05
15	35.50	7.00	32.90	7.00
16	27.70	7.00	22.50	7.00

A.4. Seguimiento de absorción de agua para el BSG posterior al secado.

Cuadro 11.32. Datos de absorción de agua en el BSG posterior al secado, evaluado durante una semana bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra I.

Tiempo total transcurrido, t/h	Masa de BSG, m/g	Humedad ambiente / %	Temperatura ambiente, $T/^\circ C$
0.00	7.0219	63	22.8
1.00	7.1484	57	23.6
4.52	7.3268	52	24.5
27.44	7.4983	53	23.3
53.09	7.4997	53	22.8
119.16	7.6380	60	23.0
143.48	7.5059	53	23.7
167.78	7.5032	53	23.2
192.13	7.5871	58	23.2
217.73	7.5791	56	24.7
291.00	7.6658	59	25.1

Cuadro 11.33. Datos de absorción de agua en el BSG posterior al secado, evaluado durante una semana bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra II.

Tiempo total transcurrido, t/h	Masa de BSG, m/g	Humedad ambiente / %	Temperatura ambiente, $T/^\circ C$
0.00	7.0095	63	22.8
1.00	7.1335	57	23.6
4.50	7.3129	52	24.5
27.43	7.4890	53	23.4
53.06	7.4893	53	23.9
119.13	7.6341	61	23.0
143.43	7.4987	53	23.7
167.18	7.4959	53	23.3
191.48	7.5822	58	23.2
217.06	7.5714	56	24.7
290.33	7.6597	60	25.2

Cuadro 11.34. Datos de absorción de agua en el BSG posterior al secado, evaluado durante una semana bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra III.

Tiempo total transcurrido, t/h	Masa de BSG, m/g	Humedad ambiente /%	Temperatura ambiente, T/°C
0.00	7.0084	61	23.0
1.00	7.1582	57	23.6
4.49	7.3489	52	24.5
27.42	7.5008	53	23.5
53.07	7.4953	53	23.9
119.10	7.6537	61	23.1
143.42	7.5100	53	23.8
167.19	7.5079	53	23.3
191.49	7.5984	58	23.2
217.09	7.5811	56	24.7
290.36	7.6671	60	25.2

Cuadro 11.35. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posterior a la exposición a condiciones ambientales durante una semana, muestra I.

Muestra	Masa de cápsula + tapa, m/g	Masa de la cápsula + muestra húmeda, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 2 h, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 3 h, m/g
1	19.9620	21.9686	21.6564	21.6552
2	20.0352	22.0379	21.7358	21.7329
3	20.0128	22.0161	21.7286	21.7264

Cuadro 11.36. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posterior a la exposición a condiciones ambientales durante una semana muestra II.

Muestra	Masa de cápsula + tapa, m/g	Masa de la cápsula + muestra húmeda, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 2 h, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 3 h, m/g
1	20.6173	22.6200	22.3701	22.3665
2	20.7138	22.7213	22.4121	22.4112
3	21.3148	23.3154	23.0086	23.0069

Cuadro 11.37. Datos obtenidos para determinar el porcentaje de humedad de cebada malteada, posterior a la exposición a condiciones ambientales durante una semana muestra III.

Muestra	Masa de cápsula + tapa, m/g	Masa de la cápsula + muestra húmeda, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 2 h, m/g	Masa de la cápsula + muestra seca a las 3 h, m/g
1	21.5803	23.5833	22.7605	23.2824
2	18.9343	20.9370	20.6518	20.6507
3	21.0551	23.0634	22.7607	22.7578

A.5. Datos para el cálculo del tiempo de estimado de secado

Cuadro 11.38. Dimensiones de granos de BSG utilizados para el estudio

Tipo de grano	Largo / m		Ancho / m	
	Grano entero	Grano en mitades	Grano entero	Grano en mitades
Medición I	0.0095	0.0047	0.0040	0.0040
Medición II	0.0095	0.0047	0.0045	0.0045
Medición III	0.0090	0.0046	0.0035	0.0035
Promedio	0.0093 ± 0.0002	0.0047 ± 0.0001	0.0040 ± 0.0005	0.0040 ± 0.0005

APÉNDICE B. DATOS INTERMEDIOS

B.1. Determinación del porcentaje de humedad para las muestras de BSG.

Cuadro 11.39. Determinación de porcentaje de humedad de la cebada malteada, sin tratamiento previo de prensado (Lote I)

Muestra	Masa de muestra, m/g	Masa agua removida, m/g	Porcentaje de humedad obtenido / %	Promedio del porcentaje de humedad / %
1	2.0015	1.5064	75.3	74.8 ± 0.8
2	1.9974	1.5038	75.3	
3	1.9951	1.4726	73.8	

Cuadro 11.40. Determinación de porcentaje de humedad de la cebada malteada, sin tratamiento previo de prensado, para lote de trabajo utilizado en el secador.

Muestra	Masa de muestra, <i>m/g</i>	Masa agua removida, <i>m/g</i>	Porcentaje de humedad obtenido / %	Promedio del porcentaje de humedad / %
1	1.9970	1.2633	63.2	62.8 ± 0.4
2	1.9943	1.2513	62.7	
3	1.9975	1.2461	62.4	

Cuadro 11.41. Determinación de porcentaje de humedad de la cebada malteada posterior de ser aplicada una carga manual de 110 lb.

Muestra	Masa de muestra, <i>m/g</i>	Masa agua removida, <i>m/g</i>	Porcentaje de humedad obtenido / %	Promedio del porcentaje de humedad / %
1	2.0072	1.2349	61.5	61.0 ± 0.4
2	1.9990	1.2124	60.6	
3	1.9979	1.2160	60.9	

Cuadro 11.42. Determinación de porcentaje de humedad de la cebada malteada posterior de ser aplicada una carga mecánica de 800 lb.

Muestra	Masa de muestra, <i>m/g</i>	Masa agua removida, <i>m/g</i>	Porcentaje de humedad obtenido / %	Promedio del porcentaje de humedad / %
1	1.9945	1.1684	58.6	58.4 ± 0.4
2	2.0026	1.1741	58.6	
3	2.0032	1.1615	58.0	

B.2. Determinación de la extracción de líquido en muestras de 600 g de grano gastado de cebada de manera manual y mecánica según corresponda.

Cuadro 11.43. Valores de extracción de líquido para una muestra de 600 g de BSG cuando se aplica una carga manual (110 lb) o mecánica (prensa hidráulica) según corresponda.

Carga aplicada, <i>W/lb</i>	Masa de líquido removido / <i>g</i>	Porcentaje de remoción de líquido / %
110	36.5 ± 6.1	6.1 ± 1.0
200	62.5 ± 5.3	10.4 ± 0.9
400	122.0 ± 7.2	20.3 ± 1.2
600	141.5 ± 11.0	23.6 ± 1.8

Cuadro 11.43. (Continuación). Valores de extracción de líquido para una muestra de 600 g de BSG cuando se aplica una carga manual (110 lb) o mecánica (prensa hidráulica) según corresponda.

Carga aplicada, W/ lb	Masa de líquido removido / g	Porcentaje de remoción de líquido / %
800	261.5 ± 10.4	43.6 ± 1.7
1000	263.0 ± 7.9	43.8 ± 1.3
1200	264.5 ± 1.8	44.1 ± 0.3
1400	265.5 ± 7.5	44.2 ± 1.3
1600	267.5 ± 4.5	44.6 ± 1.6
1800	271.2 ± 13.8	45.2 ± 2.3

B.3. Determinación de la absorción de agua del BSG, posterior al secado.

Cuadro 11.44. Coeficientes del modelo de absorción de agua del BSG, posterior al secado.

Coeficientes	<i>a</i> / (kg/h)	<i>b</i> / adimensional
Muestra I	0.1686	0.2384
Muestra II	0.1660	0.2437
Muestra III	0.1953	0.2154
Promedio	0.1766 ± 0.0622	0.2325 ± 0.0150

Cuadro 11.45. Determinación de porcentaje de humedad del BGS, posterior a la absorción de agua durante una semana, bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra I.

Muestra	Masa de muestra, <i>m</i> / g	Masa agua removida, <i>m</i> / g	Porcentaje de humedad obtenido / %	Promedio del porcentaje de humedad / %
1	2.0066	0.3134	15.6	15.1 ± 0.6
2	2.0027	0.3050	15.2	
3	2.0033	0.2897	14.5	

Cuadro 11.46. Determinación de porcentaje de humedad del BGS, posterior a la absorción de agua durante una semana, bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra II.

Muestra	Masa de muestra, <i>m</i> / g	Masa agua removida, <i>m</i> / g	Porcentaje de humedad obtenido / %	Promedio del porcentaje de humedad / %
1	2.0027	0.2535	12.6	14.5 ± 1.6
2	2.0075	0.3101	15.4	

Cuadro 11.46. (Continuación). Determinación de porcentaje de humedad del BGS, posterior a la absorción de agua durante una semana, bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra II.

Muestra	Masa de muestra, <i>m/g</i>	Masa agua removida, <i>m/g</i>	Porcentaje de humedad obtenido / %	Promedio del porcentaje de humedad / %
3	2.0006	0.3085	15.4	

Cuadro 11.47. Determinación de porcentaje de humedad del BGS, posterior a la absorción de agua durante una semana, bajo condiciones controladas de laboratorio, muestra III.

Muestra	Masa de muestra, <i>m/g</i>	Masa agua removida, <i>m/g</i>	Porcentaje de humedad obtenido / %	Promedio del porcentaje de humedad / %
1	2.0030	0.3009	15.0	14.8 ± 0.4
2	2.0027	0.2863	14.3	
3	2.0083	0.3056	15.2	

B.4. Determinación del tiempo de secado para el BSG, utilizando curvas de secado

Cuadro 11.48. Humedad en base seca y base húmeda, para corrida 4 (*T*, *v*, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Tiempo de secado, <i>t/ min</i>	Masa medida, <i>m/g</i>	Humedad en base húmeda, <i>x/ (%)</i>	Humedad Base seca, <i>X/ (kg agua/kg sólido seco)</i>
0	544.70	58.40	1.404
2	465.60	51.33	1.055
4	406.70	44.28	0.795
6	363.30	37.63	0.603
9	332.10	31.77	0.466
11	308.90	26.64	0.363
13	289.70	21.78	0.278
15	277.10	18.23	0.223
17	268.20	15.51	0.184
19	260.40	12.98	0.149
21	254.60	11.00	0.124
23	251.30	9.83	0.109
26	246.13	7.00	0.086
27	244.40	7.29	0.079

Cuadro 11.48. (Continuación). Humedad en base seca y base húmeda, para corrida 4 (T , v , δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Tiempo de secado, t / min	Masa medida, m / g	Humedad en base húmeda, x / (%)	Humedad Base seca, X / (kg agua/kg sólido seco)
32	240.40	5.74	0.061
40	235.90	3.94	0.041
56	232.30	2.46	0.025
88	230.00	1.48	0.015
152	228.80	0.96	0.010
182	227.50	0.40	0.004
192	226.60	0.00	0.000

Cuadro 11.49. Humedad en base seca y base húmeda, para corrida 12 (T , v , δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Tiempo de secado, t / s	Masa medida, m / g	Humedad en base húmeda, x / (%)	Humedad en Base seca, X / (kg agua/kg sólido seco)
0	548.80	58.40	1.404
2	470.00	51.43	1.059
4	407.80	44.02	0.786
6	363.20	37.14	0.591
8	331.90	31.21	0.454
10	309.70	26.28	0.357
12	293.50	22.21	0.286
14	281.30	18.84	0.232
17	272.10	16.10	0.192
19	265.30	13.95	0.162
21	260.20	12.26	0.140
25	253.10	9.80	0.109
26.5	251.41	9.19	0.101
29	248.60	8.17	0.089
35	245.50	7.00	0.075
37	243.70	6.32	0.067
53	239.20	4.56	0.048
85	236.60	3.51	0.036
149	233.80	2.35	0.024
179	233.80	2.35	0.024
189	228.30	0.00	0.000

Cuadro 11.50. Ecuaciones de mejor ajuste, para las gráficas de humedad en base seca en función del tiempo, para corrida 4 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Sección de la curva	Ecuaciones	
1	Ecuación	$X = -0.1331 * t + 1.3634$
	Derivada	$\frac{dx}{dt} = -0.1331$
2	Ecuación	$X = -4x10^{-5} * t^3 + 0.0031 * t^2 - 0.0955 * t + 1.0804$
	Derivada	$\frac{dx}{dt} = (-4x10^{-5}) * 3 * t^2 + 0.0031 * 2 * t - 0.0955$
3	Ecuación	$X = -6x10^{-8} * t^3 + 2x10^{-5} * t^2 - 0.0029 * t + 0.1272$
	Derivada	$\frac{dx}{dt} = (-6x10^{-8}) * 3 * t^2 + (2x10^{-5}) * 2 * t - 0.0029$

Cuadro 11.51. Ecuaciones de mejor ajuste, para las gráficas de humedad en base seca en función del tiempo, para corrida 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Sección de la curva	Ecuaciones	
1	Ecuación	$X = -0.1356 * t + 1.3666$
	Derivada	$\frac{dx}{dt} = -0.1356$
2	Ecuación	$X = -4x10^{-5} * t^3 + 0.0034 * t^2 - 0.0968 * t + 1.0403$
	Derivada	$\frac{dx}{dt} = (-4x10^{-5}) * 3 * t^2 + 0.0034 * 2 * t - 0.0968$
3	Ecuación	$X = -7x10^{-8} * t^3 + 2x10^{-5} * t^2 - 0.0028 * t + 0.1409$
	Derivada	$\frac{dx}{dt} = (-7x10^{-8}) * 3 * t^2 + (2x10^{-5}) * 2 * t - 0.0028$

Cuadro 11.52. Derivada de la humedad en base seca en función del tiempo y velocidad de secado, para corrida 4 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Sección de la curva	Tiempo de secado, t / min	Humedad en Base seca, X / (kg agua/kg sólido seco)	Derivada del porcentaje de humedad en función del tiempo (dx/dt)	Velocidad de secado, R' / (kg/m ² *min)
1	0	1.404	-0.1331	0.8136
	2	1.055	-0.1331	0.8136
	4	0.795	-0.1331	0.8136

Cuadro 11.52. (Continuación). Derivada de la humedad en base seca en función del tiempo y velocidad de secado, para corrida 4 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Sección de la curva	Tiempo de secado, t / min	Humedad en Base seca, X / (kg agua/kg sólido seco)	Derivada del porcentaje de humedad en función del tiempo (dx/dt)	Velocidad de secado, R' / (kg/m ² *min)
1	6	0.603	-0.1331	0.8136
	9	0.466	-0.0494	0.3004
	11	0.363	-0.0418	0.2448
	13	0.278	-0.0352	0.1949
	15	0.223	-0.0295	0.1507
	17	0.184	-0.0248	0.0952
	19	0.149	-0.0210	0.0655
2	21	0.124	-0.0182	0.0415
	23	0.109	-0.0164	0.0108
	26	0.086	-0.0154	0.0052
	27	0.079	-0.0156	0.0031
	32	0.061	-0.0200	0.0348
	40	0.041	-0.0016	0.0568
	56	0.025	-0.0012	0.0076
3	88	0.015	-0.0008	0.0055
	152	0.010	-0.0010	0.0090
	182	0.004	-0.0016	0.0142
	192	0.000	-0.0019	0.0164

Cuadro 11.53. Derivada de la humedad en base seca en función del tiempo y velocidad de secado, para corrida 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Sección de la curva	Tiempo de secado, t / min	Humedad en Base seca, X / (kg agua/kg sólido seco)	Derivada del porcentaje de humedad en función del tiempo (dx/dt)	Velocidad de secado, R' / (kg/m ² *min)
1	0	1.404	-0.1356	0.7916
	2	1.059	-0.1356	0.7916
	4	0.786	-0.1356	0.7916
	6	0.591	-0.1356	0.7916

Cuadro 11.53. (Continuación). Derivada de la humedad en base seca en función del tiempo y velocidad de secado, para corrida 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Sección de la curva	Tiempo de secado, t / min	Humedad en Base seca, X / (kg agua/kg sólido seco)	Derivada del porcentaje de humedad en función del tiempo (dx/dt)	Velocidad de secado, R' / (kg/m ² *min)
2	8	0.454	-0.0501	0.2940
	10	0.357	-0.0408	0.2487
	12	0.286	-0.0325	0.2092
	14	0.232	-0.0251	0.1754
	17	0.192	-0.0159	0.1474
	19	0.162	-0.0109	0.1250
	21	0.140	-0.0069	0.1084
	25	0.109	-0.0018	0.0974
	26.5	0.101	-0.0009	0.0917
	29	0.089	-0.0005	0.0926
	35	0.075	-0.0058	0.1188
	37	0.067	-0.0095	0.0094
	53	0.048	-0.0013	0.0073
	85	0.036	-0.0009	0.0046
3	149	0.024	-0.0015	0.0058
	179	0.024	-0.0024	0.0094
	189	0.000	-0.0027	0.0110

Cuadro 11.54. Tiempo de secado del BSG, para corrida 4 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Masa de solido seco, m_s/g	Velocidad crítica de secado, R'_c / (kg/m ² *min)	Área de secado la bandeja de laboratorio, A/m^2	Tiempo de secado, t / min
0.226	0.7916	0.038	14.84

Cuadro 11.55. Tiempo de secado del BSG, para corrida 12 (T, v, δ : 60 °C, 1.0 m/s, 0.030 m) de las muestras prensadas mecánicamente.

Masa de solido seco, m_s/g	Velocidad crítica de secado, R'_c / (kg/m ² *min)	Área de secado la bandeja de laboratorio, A/m^2	Tiempo de secado, t / min
0.228	0.8136	0.038	14.97

B.5. Determinación del tiempo de operación del secador

Cuadro 11.56. Datos determinados de manera teórica, a una temperatura de bulbo húmedo de 29.8 °C.

Variable	Valor
Calor latente de vaporización, $\lambda / \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	2430.31
Humedad absoluta del aire / $\left(\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg aire seco}} \right)$	0.01414

Cuadro 11.57. Datos determinados de manera teórica en tablas de aire seco a 60 °C y 1 atm de presión.

Variable	Valor
Viscosidad, $\mu / \left(\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} \right)$	0.00002008
Conductividad térmica, $k / \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right)$	0.00002808
Calor específico del gas, $C_p / \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right)$	1.007
Calor húmedo del gas de entrada, $C_h / \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg aire}\cdot\text{°C}} \right)$	1.032

Cuadro 11.58. Densidad del gas de secado a 60 °C.

Variable	Valor
Masa molar $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)$	29.0
Constante de gases ideales, $R / \left(\frac{\text{m}^3\cdot\text{atm}}{\text{kgmol}\cdot\text{K}} \right)$	$8.205746 * 10^{-2}$
Presión atmosférica, $P / (\text{atm})$	1.0
Densidad, $\rho / \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	1.060

Cuadro 11.59. Dimensiones escogidas para el diseño del secador y condiciones del aire de secado.

Variable	Valor
Velocidad del aire de secado (m/s)	1.0
Temperatura de bulbo seco de aire (°C)	60.0
Temperatura de bulbo húmedo de aire (°C)	29.8
Área de las bandejas de secado (m ²)	0.60
Flujo másico del aire (kg/s)	0.64

Cuadro 11.60. Datos de calor transferido desde el aire hacia el lecho de granos

Variable	Valor
Temperatura media logarítmica, $\Delta T_L / \text{°C}$	0.85
Calor que hay que transferir al agua, Q / kJ	135 472.2

Cuadro 11.61. Datos requeridos para determinado el tiempo de secado estimado del BSG

Variable	Valor
Eficiencia energética teórica del secador (%)	30
Tiempo de secado /h	5.54

Cuadro 11.62. Características del BSG que ingresa y sale del secador

Variable	Valor
Masa de BSG que ingresa /kg	101.14
Porcentaje de humedad en base seca del BSG que ingresa en el secador / %	1.40
Porcentaje de humedad en base seca del BSG que sale del secador / %	0.075
Masa de BSG al 7 % de humedad que sale del secador / kg	42.07
Masa de agua total a evaporar / kg	55.70

Cuadro 11.63. Principales resultados de consumo energético para diferentes condiciones de secado

Área de bandeja, A / m^2	Velocidad, $v / (m/s)$	Temperatura, $T / ^\circ C$	Espesor, δ / m	Consumo energético, E / kW
0.6	1.4	60	0.30	26.0
0.6	1.0	60	0.30	22.6
0.7	1.0	60	0.30	26.4

B.6. Determinación de la caída de presión en el secador

Cuadro 11.64. Determinación del diámetro equivalente y velocidad del aire en las tuberías

Tramo de tubería	Alto de la tubería / m	Ancho de la tubería / m	Área de la sección transversal de la tubería, A_{sT} / m^2	Perímetro de la tubería en contacto con el fluido, P_t / m	Diámetro equivalente de la tubería, D_e / m	Velocidad del aire, $v / (m/s)$
1	0.300	0.300	0.090	1.200	0.300	6.67
2	0.600	1.000	0.600	3.200	0.750	1.00

Cuadro 11.64. (Continuación). Determinación del diametro equivalente y velocidad del aire en las tuberías

Tramo de tubería	Alto de la tubería / m	Ancho de la tubería / m	Área de la sección transversal de la tubería, A_{sT} / m ²	Perímetro de la tubería en contacto con el fluido, P_t / m	Diámetro equivalente de la tubería, D_e / m	Velocidad del aire, v / (m/s)
3	0.300	0.300	0.090	1.200	0.300	6.67
4	0.150	0.300	0.045	0.900	0.200	6.67

Cuadro 11.65. Coeficientes de perdidas por expansión, contracción y accesorios.

Tramo de tubería	Perdidas por expansión súbita / adim	Perdidas por contracción súbita / adim	Pérdidas de energía por accesorios / adim
1	0.84	-	0.75
2	-	-	-
3	-	0.34	-
4	-	-	1.15

Cuadro 11.66. Pérdida de energía por fricción de superficie ($4f \frac{L_t}{D_e}$).

Tramo de tubería	Pérdida de energía por fricción de superficie / (J/kg)
1	0.083
2	0.029
3	0.059
4	0.236

Cuadro 11.67. Datos para la determinación de caída de presión en el lecho.

Variable	Valor
Longitud del lecho, L_L / m	0.42
Porosidad del lecho, ε / adimensional	0.55
Esfericidad de la partícula, Φ_s / adimensional)	1.00
Diámetro equivalente de la partícula, D_{ep} / m	0.013
Viscosidad del aire, μ / (N*s/m ²)	0.00002008
Densidad del aire, ρ / (kg/m ³)	1.060

APÉNDICE C. MUESTRA DE CÁLCULO

C.1. Cálculo del porcentaje de humedad.

Para calcular el porcentaje de humedad se utiliza la fórmula:

$$X = \frac{\text{Masa de agua (g)}}{\text{Masa de la muestra (g)}} \quad \text{C. 1}$$

Para el porcentaje de humedad para la muestra original que se encuentra en el Cuadro 11.39 columna 3, fila 2, se utilizan los datos del Cuadro 11.39, fila 2, columnas 1 y 2:

$$X = \frac{1.5064 \text{ g}}{2.0015 \text{ g}} * 100 = 75.3 \%$$

De esta manera se calculan todos los porcentajes de humedad presentes en este trabajo.

C.2. Cálculo de la cantidad de líquido extraído por la carga (lb) ejercida sobre el BSG.

El cálculo de la cantidad de líquido extraído por la aplicación de una carga (lb) sobre el BSG se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} & (\text{Muestra + Equipo})(g) - (\text{Muestra + Equipo})_{\text{post prensado}}(g) \\ & = \text{Líquido extraído (g)} \end{aligned} \quad \text{C. 2}$$

Para el valor de líquido extraído cuando se aplica una carga, en este caso la manual que se encuentra en el Cuadro 11.5, columna 3, fila 1, se utilizan los valores que se encuentran en la fila 1, columnas 1 y 2, de dicho cuadro.

$$\text{Líquido extraído} = 2869.0 \text{ g} - 2833.5 \text{ g} = 35.5 \text{ g} \quad \text{C. 3}$$

C.3. Cálculo del porcentaje de remoción de líquido tras el prensado

El resultado de los porcentajes de remoción de líquido para una muestra de 600 g de BSG, se realizan de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Cantidad de líquido extraído (g)}}{\text{Masa inicial de la muestra (g)}} * 100 = \text{Porcentaje de extracción de líquido} \quad \text{C. 4}$$

El resultado de remoción de líquido, aplicando una carga de manual (110 lb), que se muestra en Cuadro 11.43, columna 3, fila 2, se realiza utilizando el valor del Cuadro 11.43, columna 2 fila 2, de la siguiente manera:

$$\frac{36.5}{600 \text{ g}} * 100 = 6.1\%$$

C.4. Confección del diseño factorial 2³ y obtención de las gráficas para su análisis estadístico

Se confeccionó el diseño y se aleatorizaron las corridas en el programa Minitab 17. Una vez que se realizaron los experimentos y se trataron los resultados, se ingresaron los datos del Cuadro 11.31 en el mismo software, con lo cual se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 4.4 a la Figura 4.16.

C.5. Confección de la curva cinética de absorción de humedad, por parte del BSG, posteriormente al secado

Para obtener el modelo cinético de la absorción de humedad después del secado, se ingresaron los datos tabulados en el Cuadro 11.32 al Cuadro 11.34 en el programa Microsoft Office Excel, realizando una regresión potencial para obtener los coeficientes mostrados en el Cuadro 11.44.

C.6. Derivada del porcentaje de humedad en base seca en función del tiempo

Para calcular la derivada del porcentaje de humedad en base seca en función del tiempo, para la sección 2 de la curva, en un tiempo igual a 9 min, se toma la ecuación presente en la fila 5, columna 2, del Cuadro 11.50, de la siguiente manera:

$$\frac{dx}{dt} = (-4 \times 10^{-5}) * 3 * 9^2 + 0.0031 * 2 * 9 - 0.0955 = -0.0494$$

De igual manera se realiza el cálculo para todos los valores de las secciones 1, 2 y 3 de las curvas pertenecientes a las corridas 4 y 12, que fueron sometidas al prensado mecánico, según corresponda su derivada. Dichos resultados se muestran en el Cuadro 11.52 y Cuadro 11.53.

C.7. Cálculo de la velocidad de secado del BSG a través del tiempo

Para este cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$R' = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad 2.6$$

El valor de la velocidad de secado que se encuentra en la fila 3, columna 5 del Cuadro 11.52, determinado para la corrida 4 del BSG prensado de manera mecánica, se realizó utilizando los valores del Cuadro 11.54, fila 2, columnas 1 y 3, además del valor del Cuadro 11.52 fila 3, columna 4 de la siguiente manera:

$$R' = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} = -\frac{0.226}{0.038} * -0.1331 = 0.8136 \quad 2.7$$

De igual forma se realiza el cálculo para todos los valores de velocidad de secado.

C.8. Cálculo del tiempo total de secado para el BSG.

Para determinar el tiempo de secado que se requiere para llegar a una humedad en base seca de 0.086 (7 % de humedad en base húmeda), de la corrida 4 del BSG prensado de manera mecánica, se utilizó la siguiente ecuación:

$$t = \frac{m_s}{AR'_c} \left(X_0 - X_c + X_c * \ln \frac{X_c}{X_2} \right) \quad 2.8$$

Se utilizaron los valores del Cuadro 11.54, fila 2, columnas 1, 2 y 3; también los valores de la columna 3, filas 2, 5 y 14, del Cuadro 11.52, como se muestra a continuación:

$$t = \frac{0.226}{0.038 * 0.7916} \left(1.404 - 0.603 + 0.603 * \ln \frac{0.603}{0.086} \right) = 14.84 \text{ min}$$

De igual manera se realizó el cálculo del tiempo de secado para la corrida 12, de diseño factorial para las muestras prensadas de manera mecánica.

C.9. Masa de sólidos secos por grano

La masa de sólidos secos por grano se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$m'_s = \pi * r^2 * h_p * \rho_s \quad C.5$$

La masa de semillas enteras que se muestra en el Cuadro 5.2 columna 2, fila 2, se calcula utilizando los datos del Cuadro 11.38, fila 6, columnas 2 y 4.

$$m'_{sen} = \pi * 0.0020^2 \text{ m}^2 * 0.0093 \text{ m} * 323.23 \text{ kg/m}^3 = 0.0000379 \text{ kg}$$

De igual manera se calcula la masa de sólidos secos de las semillas en mitades.

C.10. Área superficial de la partícula

Para calcular el área superficial únicamente de una partícula se utiliza la fórmula:

$$A' = \pi * D_p * h \quad \text{C. 6}$$

Para el valor de las semillas enteras que se encuentra en el Cuadro 5.2 columna 3, fila 2 se utilizan los valores del Cuadro 11.38, fila 6, columnas 2 y 4., de la siguiente manera:

$$A' = \pi * 0.0040 \text{ m} * 0.0093 \text{ m} = 0.000117 \text{ m}^2$$

C.11. Área total expuesta

Esta es la suma del área total expuesta para granos enteros y en mitades. La masa de solidos secos totales es de 42.07 kg, de los cuales 28.05 kg corresponden a las semillas enteras y 14.02 kg a semillas en mitades. Se calcula de la siguiente manera:

$$A_{Total \text{ Expuesta}} = \frac{m_{S,T}}{m'_s} * A' \quad \text{C. 7}$$

Para las semillas enteras, se calcula utilizando los datos del Cuadro 5.2 columna 2, fila 2. El resultado se muestra en el Cuadro 5.2 columna 4, fila 2.

$$A = \frac{28.05 \text{ kg}}{0.0000379 \text{ kg}} * 0.000117 \text{ m}^2 = 86.77 \text{ m}^2$$

C.12. Densidad del aire

Para calcular la densidad del gas a una temperatura de 60 °C que se muestra en el Cuadro 11.58, columna 2, fila 5, se utiliza la fórmula:

$$\rho_a = \frac{M * P}{R * T} \quad \text{C. 8}$$

Con los valores del Cuadro 11.58, columna 2, filas 2, 3 y 4, de la siguiente manera:

$$\rho_a = \frac{29 * 1}{(8.205746 * 10^{-2}) * 333.15} = 1.060 \frac{kg}{m^3}$$

C.13. Número de Reynolds basado en diámetro de partícula

Para el número de Reynolds basado en el diámetro de partícula que se encuentra en el Cuadro 5.3, columna 1, fila 2, la fórmula utilizada fue:

$$Re = \frac{D_p * v * \rho_a}{\mu} \quad \text{C. 9}$$

Se utilizaron los valores del Cuadro 11.38 columna 4, fila 6, del Cuadro 11.57, columna 2, fila 2 y del Cuadro 11.58 columna 2, fila 5.

$$Re = \frac{0.0040 * 1.0 * 1.060}{0.00002008} = 211.32$$

C.14. Número de Prandtl

Para el número de Prandtl que se encuentra en el Cuadro 5.3, columna 2, fila 2, la fórmula utilizada fue:

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k} \quad \text{C. 10}$$

Se utilizaron los valores del Cuadro 11.57, columna 2, fila 2, 3 y 4, como se muestra a continuación:

$$Pr = \frac{1.007 * 0.00002008}{0.02808 * 10^{-3}} = 0.720$$

C.15. Coeficiente de transferencia de calor

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor que se encuentra en el Cuadro 5.3, columna 3, fila 2, se utiliza la siguiente fórmula:

$$h = \frac{k * 1.17 * Re^{0.585} * Pr^{1/3}}{D_p} \quad \text{C. 11}$$

Utilizando los valores del Cuadro 5.3, fila 2, columnas 1 y 2, además del Cuadro 11.57, columna 2, fila 3 y del Cuadro 11.38 columna 4, fila 6.

$$h = \frac{(0.02808 * 10^{-3}) * 1.17 * 211.32^{0.585} * 0.720^{1/3}}{0.0040} = 0.169 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 * \text{K}}$$

C.16. Flujo másico del aire

Para los cálculos de flujo másico de aire que se encuentra en el Cuadro 11.51 columna 2, fila 4 se utilizó la fórmula:

$$\dot{m} = v * A * \rho_a \quad \text{C. 12}$$

Para este cálculo se utilizan los valores encontrados en el Cuadro 11.58, columna 2, fila 5 y Cuadro 11.51 columna 2, filas 1 y 3.

$$\dot{m} = 1.0 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.6 \text{ m}^2 * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * 1.060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.64 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

C.17. Calor húmedo en el aire de entrada

El calor húmedo que se encuentra en el Cuadro 11.57, columna 2, fila 6, se calcula mediante la fórmula:

$$C_h = 1.005 + 1.884 * Y' \quad \text{C. 13}$$

Para el valor de la humedad absoluta del gas se utiliza el valor del Cuadro 11.56, columna 2, fila 5, de la siguiente manera:

$$C_h = 1.005 + 1.884 * 0.01414 = 1.032 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire} * ^\circ\text{C}}$$

C.18. Diferencia media logarítmica de temperatura ($\Delta\bar{T}_L$)

La diferencia media logarítmica que se encuentra en el Cuadro 11.60, columna 2, fila 2, se obtiene de las formulas:

$$\text{Ln}\left(\frac{T_{hb} - T_w}{T_{ha} - T_w}\right) = \frac{h * A}{\dot{m}_g * C_h} \quad \text{C. 14}$$

$$\Delta\bar{T}_L = \frac{(T_{hb} - T_w) - (T_{ha} - T_w)}{\text{Ln}\left(\frac{T_{hb} - T_w}{T_{ha} - T_w}\right)} \quad \text{C. 15}$$

Para realizar este proceso se ingresan los datos en el software Excel donde se igualan las ecuaciones para encontrar el $\Delta\bar{T}_L$. En este cálculo se utilizaron los datos que se encuentran en el Cuadro 11.57, columna 2, fila 6, Cuadro 11.51 columna 2, filas 3, 4 y 6, Cuadro 5.3, columna 3, fila 2, Cuadro 5.2 columna 4, fila 2. De manera que se obtiene:

$$\Delta\bar{T}_L = 0.85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.19. Velocidad de la transferencia de calor

Para obtener la velocidad de transferencia de calor Cuadro 5.4, columna 2, fila 2, se utilizó:

$$q_T = h * A * \Delta\bar{T}_L \quad \text{C. 16}$$

Para lo que se tomaron los valores del Cuadro 11.60, columna 2, fila 2, Cuadro 5.2 columna 4, fila 2 y Cuadro 5.3, columna 3, fila 2, como se muestra a continuación:

$$q = 0.169 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}} * 130.2 \text{ m}^2 * 0.85 \text{ } ^\circ\text{C} = 22.6 \text{ kW}$$

C.20. Masa de sólido seco del lote total de 130 kg, posterior al prensado

Para encontrar este valor se utiliza la formulas

$$\text{Masa de sólido seco} = \text{Masa sólido húmedo} - (\text{Masa sólido húmedo} * X) \quad \text{C. 17}$$

Para lo que se utilizan los valores del Cuadro 11.42, columna 5, fila 2 y Cuadro 11.62 columna 2, fila 2. El resultado se muestra en el Cuadro 11.62, columna 2, fila 6.

$$\text{Masa de sólido seco} = 101.14 - (101.14 * 58.4) = 42.07 \text{ kg}$$

C.21 Porcentaje de humedad en base seca

$$X' = \frac{\text{Masa sólido húmedo} - \text{Masa sólido seco}}{\text{Masa sólido seco}} \quad \text{C. 18}$$

Para la humedad final se utiliza el Cuadro 11.30, columna 4, filas 4 y 20.

$$X' = \frac{543.20 - 242.99}{242.99} = 0.075$$

C.22. Cantidad de masa de agua total a evaporar

Con el fin de encontrar la cantidad de agua por evaporar se sutiliza la fórmula:

$$\text{Masa de agua a evaporar} = \text{Masa sólido seco} * (X'_i - X'_f) \quad \text{C. 19}$$

La información necesaria se obtiene del Cuadro 11.62, columna 2, filas 3 ,4 y 5. El resultado se presenta en el Cuadro 11.62, columna 2, fila 6.

$$\text{Masa de agua a evaporar} = 42.07 \text{ kg} * (1.4 - 0.075) = 55.70 \text{ kg}$$

C.23. Cantidad de calor que hay que transferir al agua

Para determinar la cantidad calor que hay que transferir al agua, que se muestra en el Cuadro 11.60, columna 2, fila 3 se utilizó la fórmula:

$$\text{Cantidad de calor por transferir} = \text{Masa de agua a evaporar} * \lambda \quad \text{C. 20}$$

Los datos necesarios se obtienen del Cuadro 11.62, columna 2, fila 6 y Cuadro 11.56, columna 2, fila 2.

$$57.7427\text{kg} * 2430.31 \text{ kJ/kg} = 135\ 472.2 \text{ kJ}$$

C.24. Tiempo de secado

El tiempo de secado del BSG se calcula según la siguiente fórmula:

$$\frac{Q}{q} = t \quad \text{C. 21}$$

Toma en cuenta los datos presentes en el Cuadro 11.61, columna 2, fila 2, Cuadro 11.60, columna 2, fila 3 y Cuadro 5.4, columna 2, fila 2.

$$t = \frac{(135\ 472.2/0.30) \text{ kJ}}{22.6 \text{ kW}} = 19938.8 \text{ s} = 5.54 \text{ h}$$

Este resultado se muestra en el Cuadro 11.61 columna 2, fila 3.

C.25. El diámetro equivalente de la tubería

Para determinar el diámetro equivalente de la tubería 1, que se muestra en el Cuadro 11.64, columna 2, fila 2, se utilizó:

$$D_e = 4 * \frac{A_{ST}}{P_t} \quad \text{C. 22}$$

Se utilizaron los datos del Cuadro 11.64, columnas 4 y 5, fila 2, como se muestra a continuación:

$$D_e = 4 * \frac{0.090}{1.200} = 0.300$$

C.26. Número de Reynolds para la determinación de la caída de presión en el secador.

El número de Reynolds que se muestra en el Cuadro 5.6, columna 2, fila 2, para el primer tramo de la tubería se determina de la siguiente manera:

$$Re = \frac{D_e v \rho_a}{\mu} \quad \text{C. 23}$$

Los datos requeridos para la realización de este cálculo se encuentran en el Cuadro 11.64 columnas 6 y 7, fila 2, Cuadro 11.57 columna 2, fila 6 y Cuadro 11.58, columna 2, fila 5, de la siguiente manera:

$$Re = \frac{0.300 * 6.667 * 1.060}{0.00002008} = 105\ 577.7$$

C.27. Factor de fricción de Fanning mediante le ecuación de Swamee-Jain:

Para este cálculo se utiliza la ecuación:

$$f = 0.33125 \left\{ \ln \left[0.27 \frac{\varepsilon}{D_e} + 5.74 Re^{-0.9} \right] \right\}^{-2} \quad \text{C. 24}$$

Los resultados se encuentran en el Cuadro 5.6, columna 3, fila 2 para el primer tramo de tubería se calculan con los valores encontrados en el Cuadro 5.6, columna 2, fila 2 y Cuadro 11.64, columna 2, fila 2.

$$f = 0.33125 \left\{ \ln \left[0.27 \frac{0.000015}{0.300} + 5.74 * (105\ 577.7)^{-0.9} \right] \right\}^{-2} = 0.0045$$

C.28. Factor de corrección de la energía cinética

El factor de corrección de la energía cinética para el tramo 1 que se muestra en el Cuadro 5.6, columna 4, fila 2, se calcula mediante la ecuación:

$$\alpha = 1 + 0.78 f(15 - 15.9\sqrt{f}) \quad \text{C. 25}$$

Utilizando el valor encontrado en el Cuadro 5.6, columna 3, fila 2.

$$\alpha = 1 + 0.78 * 0.0045 * (15 - 15.9\sqrt{0.0045}) = 1.052$$

C.29. Coeficiente de pérdidas por expansión súbita

Para determinar el coeficiente de pérdidas por expansión súbita que se encuentra en el Cuadro 11.64, columna 2, fila 2, se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$K_e = \left(1 - \left(\frac{D_{e1}}{D_{e2}}\right)^2\right)^2 \quad \text{C. 26}$$

Este valor se obtiene utilizando los datos del Cuadro 11.64, columna 7, filas 2 y 3.

$$K_e = \left(1 - \left(\frac{0.300}{0.750}\right)^2\right)^2 = 0.84$$

C.30. Coeficiente de pérdidas por contracción súbita

Para determinar el coeficiente de pérdidas por contracción súbita que se encuentra en el Cuadro 11.64, columna 3, fila 4, se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$K_c = 0.4 \left(1 - \left(\frac{D_{e1}}{D_{e2}}\right)^2\right)^2 \quad \text{C. 27}$$

Este valor se obtiene utilizando los datos del Cuadro 11.64, columna 7, filas 3 y 4.

$$K_c = 0.4 \left(1 - \left(\frac{0.300}{0.750}\right)^2\right)^2 = 0.34$$

C.31. Pérdidas de energía totales por fricción (h_f)

Para calcular cada una de las pérdidas por fricción se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$h_f = (4f \frac{L_t}{D_e} + K_c + K_e + K_f) * \frac{v^2}{2} \quad \text{C. 28}$$

Para el tramo 1, cuyo valor se encuentra en el Cuadro 5.7, columna 2, fila 2, se utilizan los valores que se encuentran en el Cuadro 11.65, columnas 2 y 4, fila 2, Cuadro 5.6, columna 3, fila 2, Cuadro 11.64 columna 7, fila 2.

$$h_f = (0.0083 + 0.84 + 0.75) * \frac{6.67^2}{2} = 37.38$$

C.32. ΔP en los tramos de la tubería

Se utilizó para todos los tramos de tubería la siguiente formula:

$$\Delta P_T = \rho_a \left(\frac{\alpha(v_2^2 - v_1^2)}{2} - gh_2 + h_f \right) \quad \text{C. 29}$$

Se aprecia el resultado para el primer tramo de tubería, en el Cuadro 5.7, columna 3, fila 2. Para dicho resultado se utilizaron los valores del Cuadro 5.7, columna 2, fila 2, Cuadro 11.64 columna 7, fila 2 y 3, Cuadro 11.58, columna 2, fila 5, de la siguiente manera:

$$\Delta P_T = 1.060 * \left(\frac{1.052 * (1.00^2 - 6.67^2)}{2} + 37.17 \right) = 29.5$$

C.33. Caída de presión en el lecho de BSG y potencia requerida del ventilador

La caída de presión en el lecho de los granos de BSG, que se muestra en el Cuadro 5.8, columna 2, fila 6, se calcula mediante la ecuación de Ergun de la siguiente manera:

$$\Delta P = L_L \left(\frac{150 v \mu (1 - \varepsilon)^2}{\Phi_s^2 D_{ep}^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75 \rho_a v^2 (1 - \varepsilon)}{\Phi_s D_p \varepsilon} \right) \quad \text{C. 30}$$

Se utilizan para este cálculo los valores mostrados en el Cuadro 11.67, en su totalidad, según corresponda, de la siguiente manera:

$$\Delta P = 0.42 * \left(\frac{150 * 1 * (2.01 * 10^{-5}) (1 - 0.55)^2}{1^2 * 0.013^2 * 0.55^3} + \frac{1.75 * 1.06 * 1^2 (1 - 0.55)}{1 * 0.013 * 0.55} \right) = 171.4 Pa$$

C.34. Consumo eléctrico por mes del secador

Para este cálculo se utiliza la fórmula:

$$\frac{\text{Potencia total}(kW) * \text{tiempo de operación} (h)}{\text{Consumo electrico por mes}} = \quad \text{C. 31}$$

Se considera que un mes posee 4.33 semanas, en las cuales el secador trabaja 6 h por día, 6 días a la semana, por lo que el tiempo de operación es de 155.88 h al mes, por lo que se tiene:

$$22.906 kW * 181.86 (h) = 3570.6 kWh$$

C.35. Costo en colones de operar el secador

Para este cálculo se utilizó la fórmula:

$$\text{Consumo eléctrico por mes}(kWh) * \text{tarifa electrica} (\text{colones}) = \text{Costo} \quad \text{C. 32}$$

Se considera que la tarifa es de 64.22 colones ya que el consumo eléctrico supera los 3 000 kWh por mes. Por lo tanto, se tiene que:

$$3570.6 kWh * 64.22 colones = 229 303.1 colones$$

C.36. Prueba de Cochran

La prueba estadística de Cochran se toman las desviaciones estándar mostradas en el Cuadro 4.4, se utiliza la fórmula:

$$C = \frac{s_{max}^2}{\sum_{i=1}^p s_i^2} \quad 4.1$$

De la siguiente manera para el prensado manual:

$$C = \frac{4.95^2}{0.64^2 + 2.83^2 + 2.83^2 + 4.74^2 + 0.35^2 + 4.31^2 + 0.71^2 + 4.95^2} = 0.297$$

De igual manera para los datos de prensado mecánico, presentes en el Cuadro 4.4, obteniendo el resultado de 0.315.

APÉNDICE D. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

D.1. Determinación del porcentaje de humedad en la muestra.

1. Limpiar las cápsulas de aluminio con jabón, enjuagar el con agua de grifo y agua destilada.
2. Llevar a las cápsulas a masa constante en una estufa de humedad a 130 °C.
3. En una balanza analítica pesar en la cápsula con tapa una masa de muestra de BSG de 2.000 g aproximadamente.
4. Colocar en la estufa de humedad la capsula con la muestra de BSG, a 130 °C, por espacio de 1 h, posteriormente sacar y reservar en un desecador hasta que la cápsula se encuentre a temperatura ambiente y pesar en una balanza analítica.
5. Repetir el paso 4, hasta que la masa de la muestra llegue a peso constante.
6. Determinar el peso final de la muestra y determinar el porcentaje de humedad en la muestra.

D.2. Determinación del porcentaje de extracción en la muestra tras el prensado mecánico.

1. Determinar la masa del sistema de prensado, que incluye el cilindro y la manta de prensado.
2. Medir 600 g de BSG en el cilindro de la prensa, en una balanza granataria.
3. Pesar el recipiente recolector del agua de prensa.
4. Colocar el cilindro con el material en la prensa hidráulica y ajustar el embolo, y ajustar los tornillos del equipo con la llave inglesa.
5. Prensar a una carga de 800 lb, durante 3 min el material e ir recoger el agua de prensa que se extrae.
6. Para el prensado manual repetir los pasos 1, 2 y 3. Después colocar el cilindro en una balanza de piso y ejercer una carga de 110 lb apretando el embolo sobre la muestra.
7. Finalmente determinar por diferencia la cantidad de masa de agua de prensa extraída.
8. Limpiar el equipo.

D.3. Determinación de las curvas de secado en el secador de circulación de aire a través del sólido.

1. Revisar y llevar que el recipiente con agua encargado de suministrar el líquido al lector de bulbo húmedo tenga el nivel adecuado.
2. Colocar la bandeja (limpia) en el secador y encender el equipo, colocar los valores escogidos de velocidad y temperatura del aire. Esperar a que se estabilicen las condiciones deseadas.
3. Tarar el equipo.

4. El secador indica el momento de sacar las bandejas, por lo que el aire se desvía por una tubería paralela y no pasa por la cámara de secado. En ese momento se saca la bandeja y se le agrega la muestra de BSG de 1.5 cm o 3.0 cm de espesor según corresponda, finalmente se ingresa de nuevo la bandeja dentro del secador.
5. Presionar el botón de continuar para que el secador desvíe la corriente de aire al ducto donde se encuentra la cámara de secado.
6. El sistema automatizado registra los valores de humedad en la muestra, tiempo de secado, temperatura de entra y salida del aire, temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo y velocidades de aire.
7. Finalmente, cuando la muestra se encuentra seca a las condiciones deseadas, la muestra se retira de la cámara y se guardan los datos recolectados.
8. El equipo se limpia y se alista para colocar una siguiente muestra.

D.4. Determinación de la absorción de agua por parte del BSG posterior al secado.

1. Lavar y secar las cápsulas de vidrio, pre-pesar las cápsulas vacías.
2. Pesar 7.000 g aproximadamente del grano seco en la cápsula.
3. Las condiciones se controlaron a una humedad promedio en el aire de 56 % y una temperatura ambiente promedio de 23.9 °C.
4. Se realizaron las mediciones de masa de la cápsula más la muestra una vez al día, por la mañana.
5. Terminado ese periodo se determinó por diferencia la masa final de la muestra de BSG.
6. Se limpió el equipo.

CAPÍTULO 12. ANEXOS

Anexo 1. Cotizaciones de proveedores



28/01/2019

Proforma # 28012019-9

SRITA. DANIA J. CISNEROS

Sometemos a su consideración la siguiente oferta :

HORNO INDUSTRIAL DE SECADO

MODELO: LI-760-10060126 ECM

Equipo industrial con circulación de aire forzado, diseñado para constante trabajo en el uso de secado, precalentamiento u otra aplicación donde se requiera una temperatura máxima de 150°C. Este horno no mezcla los productos y no es para usos con solventes o vapores flamables, ocupa un equipo adicional.

CONTROL:

- Panel de control lateral.
- Control de temperatura digital y termocupla USA.
- Alarma por exceso de temperatura al dispuesto.
- Damper para acelerar la velocidad de secado según su necesidad
- Luces piloto indicadoras del funcionamiento.
- Switch de baja o alta potencia.
- Switch de on / off para los diferentes circuitos.

SEGURIDAD ELECTRICA:

- Contactor para motor y de estado sólido para resistencias.
- Relay térmico para los motores.
- En caso de que el motor no trabaje , el calentamiento no se da.
- Breakes para los diferentes circuitos. Ventilador panel control
- Control de seguridad para la temperatura máxima
- Filtro de gruesos de aire reciclado
-

CARACTERISTICAS :

- Estructura total de laminado inoxidable 304 # 20
- Panel de control a un lado del horno.
- Circulación del aire descendente, ducto de salida de vapores
- Medida interna libre: 100 cm frente, 60 cm fondo, 126 cm alto.
- Piso de lámina.
- Una puerta que se ajusta por igual a todo el perímetro del marco, para garantizar un sello perfecto, pues sino el aire no baja en su totalidad.
- Empaque para calor siliconado con sello a presión.
- Desagüe del agua condensada
- Aislante de fibra de vidrio de 2".

Figura 12.1. Cotización del secador por la empresa

OVENTEC, (2019).



28/01/2019

Proforma # 24012019-10

- Capacidad de 28 bandejas de 50 x 60 cm
- No se incluye carro ni bandejas.
- Medidas de todas sus partes respetando el diseño aportado por el Sr. Juan Diego Alpizar el día 14 enero 2019
- Motor cerrado de carcasa chorreada, blower de alta presión inoxidable, 2200 cfm.
- Fuente de poder , 22 Kwatts. 220 volts monofásico.
- Consumo de 100 amp / fase, se recomienda cable de # 2 o 1/0

PRECIO ELECTRICO : 5.270.000,00 colones

CONDICIONES:

- Garantía: 1 años
- Tiempo de entrega: según convengan las partes.
- Precios: más impuestos.
- No incluye el costo de las bandejas por retraso del proveedor en la información .
- No incluye transporte, por desconocer la ubicación y condiciones

NOTA: Nuestros equipos son 100% nuevos en todas sus partes, (son personalizados) no son reconstruidos ni provienen de almacenes OULET de equipos de segunda categoría.

P/ OventeC S.A:
Ing. Max Quesada B.

Figura 12.1. (Continuación)Cotización del secador por la empresa OVENTEC, (2019).



Cotización

Prensa hidráulica para 26 kg de cebada con bomba manual (tipo gato hidráulico)

Características técnicas del equipo

Fabricación estructural con los siguientes materiales:

Cilindro perforado de acero inoxidable 304

Cilindro recolector y canalizador de líquido en acero inoxidable 304

Barras y tuercas de ajuste en acero inoxidable 304

Plato de presión en acero inoxidable 304

Platos de tope en acero A36 (este no hace contacto con el producto)

Dimensiones

Dimensiones aproximadas de la prensa 1200mm x 400mm x 400 mm (Dependiendo de la definición final de la posición del pistón o por requerimientos de comodidad, la mediada de altura puede variar)

Dimensiones del cilindro contenedor de producto 650 mm de altura x 340 mm de diámetro

Capacidad en volumen del cilindro 0,05 m³ de producto

Dimensiones de los platos de tope 340mm de diámetro, 25,4 mm de espesor

Dimensiones del plato de presión 340 mm de diámetro, 12,7mm de espesor con refuerzos tipo ángulo en lamina inoxidable, para aumentar la capacidad de soporte en libras de presión

Figura 12.2. Cotización de la prensa hidráulica.
 Soluciones Industriales F & M, (2019).

Capacidad en volumen del cilindro 0,05 m³ de producto
Dimensiones de los platos de tope 340mm de diámetro, 25,4 mm de espesor
Dimensiones del plato de presión 340 mm de diámetro, 12,7mm de espesor con refuerzos tipo ángulo en lamina inoxidable, para aumentar la capacidad de soporte en libras de presión

Capacidades

Capacidad del gato hidráulico 8000 kilos.

Costo total del proyecto: **¢ 1,380,000.00**

Forma de pago: 50% por adelantado y 50% contra entrega

Garantía: 1 año contra defectos de fabricación

Entrega: 30 días hábiles después de formalizada la compra.

Figura 12.2 (Continuación) Cotización de la prensa hidráulica.
Soluciones Industriales F & M, (2019).

MAQUINARIA INDUSTRIAL TAINEA S, A
TELEFONO: 2272-1355/ FAX: (+506) 2272-0032
CÉDULA JURICA NO. 3-101-063638-34
SAN JOSÉ, COSTA RICA

Fabricantes de:
 MOLINOS DE
 MARTILLOS CON
 CAPACIDAD DE 10 A 300
 QUINT. POR HORA; EN
 ACERO INOXIDABLE Y
 HIERRO NEGRO PARA
 FRUTAS, GRANOS Y
 CEREALES

MEZCLADORAS
 HORIZONTALES Y
 VERTICALES CON
 CAPACIDADES 250
 QUINT. A 40 QUINT. Y
 CERNIDORES

DESHDRATADORAS DE
 BANDEJAS CON Y SIN
 CARRITOS

REBANADORAS DE
 TUBERCULOS

AUTOCLAVES

EXAUSTER

BANDAS
 TRANSPORTADORAS

LAVADORA DE PAPA,
 YUCA, ETC.

ELEVADORES DE
 CANJILONES Y SIN FIN

MARMITAS DE 20 A 500
 GALONES PARA SER
 UTILIZADOS CON
 VAPOR, GAS PROPANO
 Y ELECTRICAS

AGITADORES TIPO
 PROPELA O ANCLA

EXTRUCTURAS
 METALICAS

TANQUES
 ESTACIONARIOS Y
 CISTERNA

EXTRACTORES DE AIRE

DESPULPADORES

EQUIPO PARA ELL
 TOSTADO DEL CAFÉ

EQUIPOS EN ACERO
 INOXIDABLE

MESAS DE TRABAJO Y

TOLBAS

Y MUCHOS OTROS
 EQUIPOS

San José, 25 de enero del 2019
 Cotización # 19-6009

Señorita:
Dania J. Cisneros
Presente.

Estimada señorita:

Reciba en primera instancia un sincero saludo y a la vez un sincero agradecimiento por la oportunidad de poderle brindar nuestros servicios por la fabricación de lo siguiente:

Construcción de **VEINTIOCHO BANDEJAS:** Fabricadas en lámina acero inoxidable calidad 304 en 1 mm de espesor, con fondo en cedazo inoxidable # 10, medidas de las bandejas 0.50 cm x 0.60 cm x 4 cm alto de ceja.

VALOR: c 1.752.000,00 (Un millón setecientos cincuenta y dos mil colones) más impuesto de ventas.

FORMA DE PAGO: 60% como adelanto del trabajo
 40% restante contra entrega

GARANTÍA: Seis meses en la parte mecánica

TIEMPO DE ENTREGA: A convenir

NOTA: a) Validez de la oferta 15 días hábiles.

b) Monto de la oferta sujeto a existencia en stock.

c) La garantía no cubre daños ocasionados por el mal uso, mala instalación o desgaste normal de los equipos.

d) No incluye transporte, ni instalación eléctrica.

e) Se excluye de esta oferta lo no mencionado, ni detallado, ni cotizado.

g) Cuentas bancarias BNCR 100-1-000117064-6 / BCR # 001-0205045-5

Esperamos que nuestra oferta llene sus expectativas para así poderles brindar nuestros servicios profesionales.

Atentamente,
 P/ TALLER INDUSTRIAL TAINEA, S.A.



 Eduardo Alfaro Herrera
GERENTE GENERAL

Figura 12.3. Cotización de las bandejas para el secador por parte de la empresa TAINEA, S.A, (2019).

Anexo 5. Condiciones meteorológicas reportadas por el Instituto Meteorológico Nacional, por la estación de Santa Lucía.

10/9/2018

Mapa de Costa Rica - IMN

Santa Lucía

Ubicación: Barva de Heredia

Lat: 10° 1' 0" Norte Lon: 84° 5' 59" Oeste Altitud: 1200 m.s.n.m.

Tipo: Manual

Período

Lluvia: 1983 - 2016

Temperatura: 1982 - 2016

Humedad: 1998 - 2016

Promedios mensuales

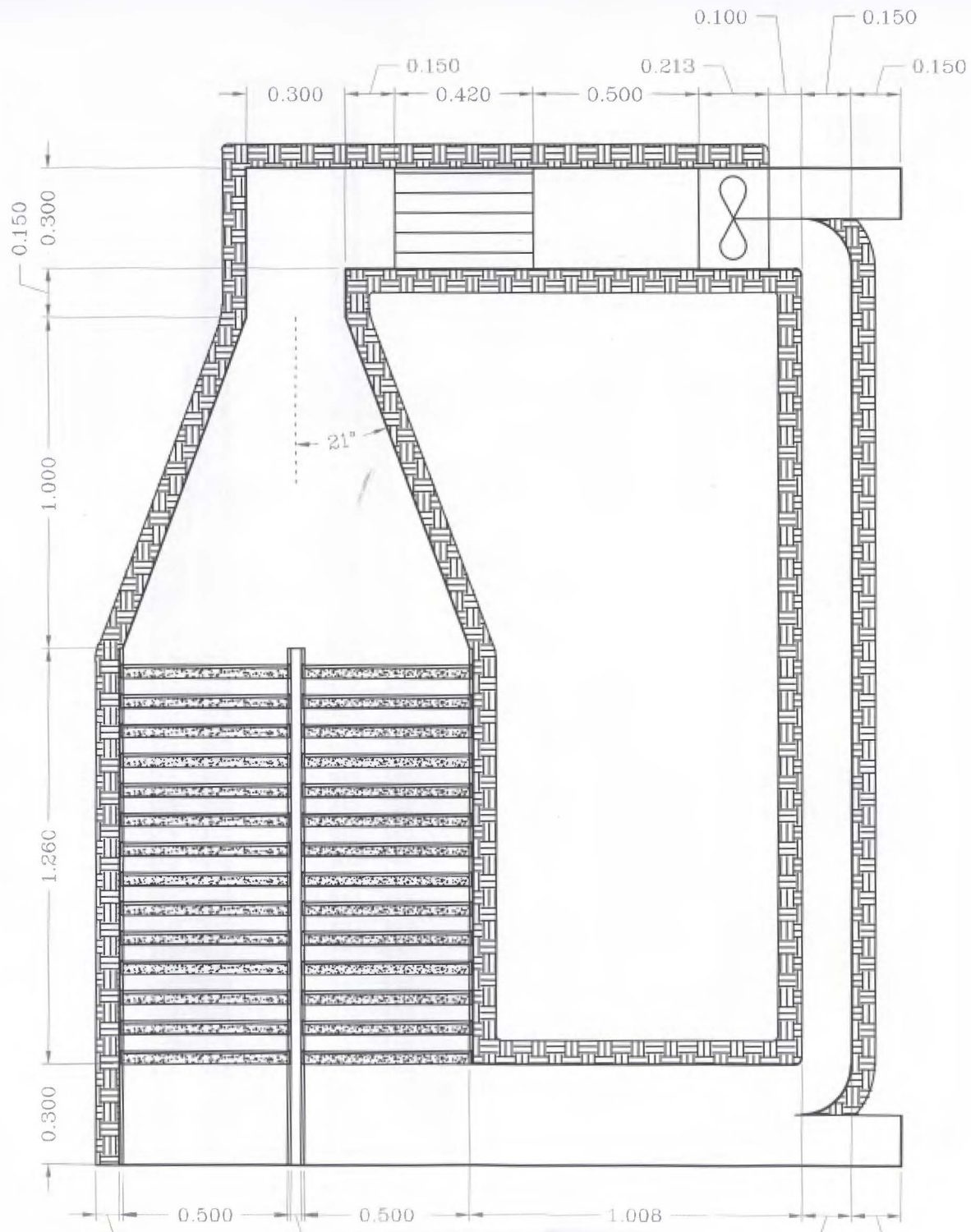
Mes	Temperatura (°C)			Humedad Relativa(%)	Lluvia (mm)	Días con lluvia (mm)
	Max.	Min.	Med.			
ENE	24.3	14.9	19.6	74	17.6	5
FEB	25.3	14.7	20.0	73	23.2	4
MAR	26.4	14.8	20.6	72	41.0	4
ABR	26.8	15.3	21.1	76	115.6	9
MAY	25.9	15.8	20.9	84	333.3	21
JUN	25.3	15.7	20.5	86	329.9	22
JUL	25.1	15.9	20.5	83	204.8	20
AGO	24.5	15.2	19.8	85	255.8	22
SEP	25.1	15.3	20.2	90	416.8	24
OCT	24.0	15.0	19.5	88	441.2	25
NOV	24.5	15.6	20.1	83	184.2	18
DIC	23.4	15.0	19.2	79	54.6	9

Figura 12.4. Condiciones meteorológicas para Barva de Heredia, en la estación Santa Lucía.

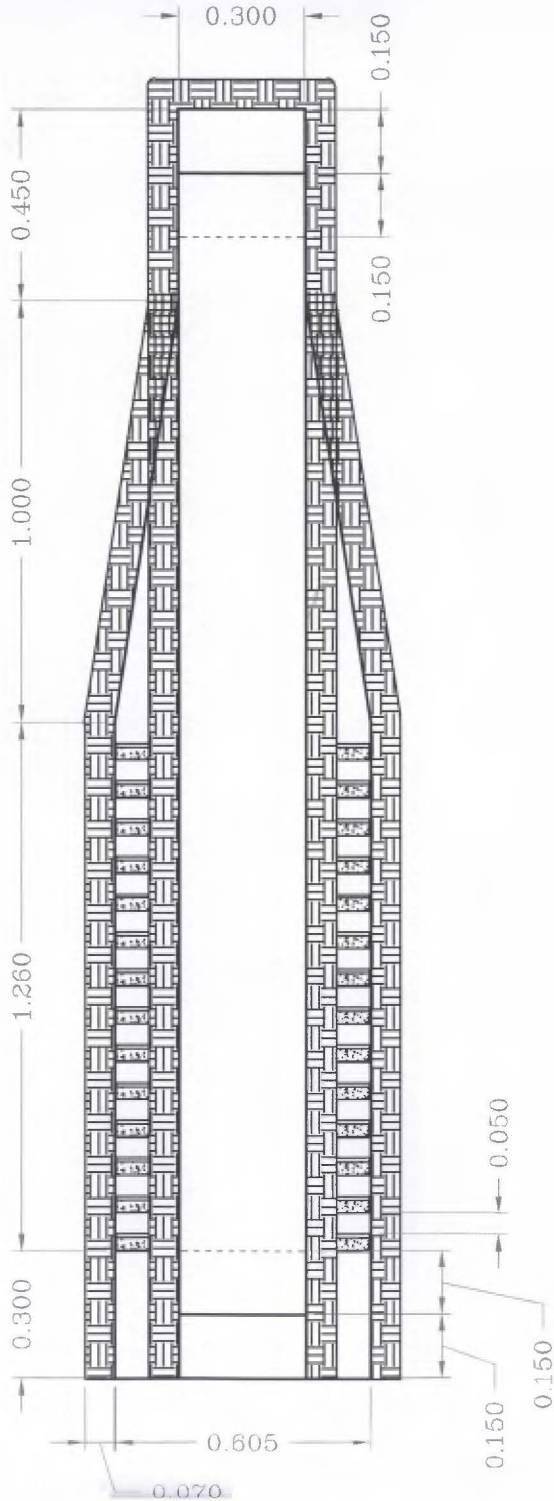
(Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2018)

Anexo 2. Diagramas de flujo y equipo

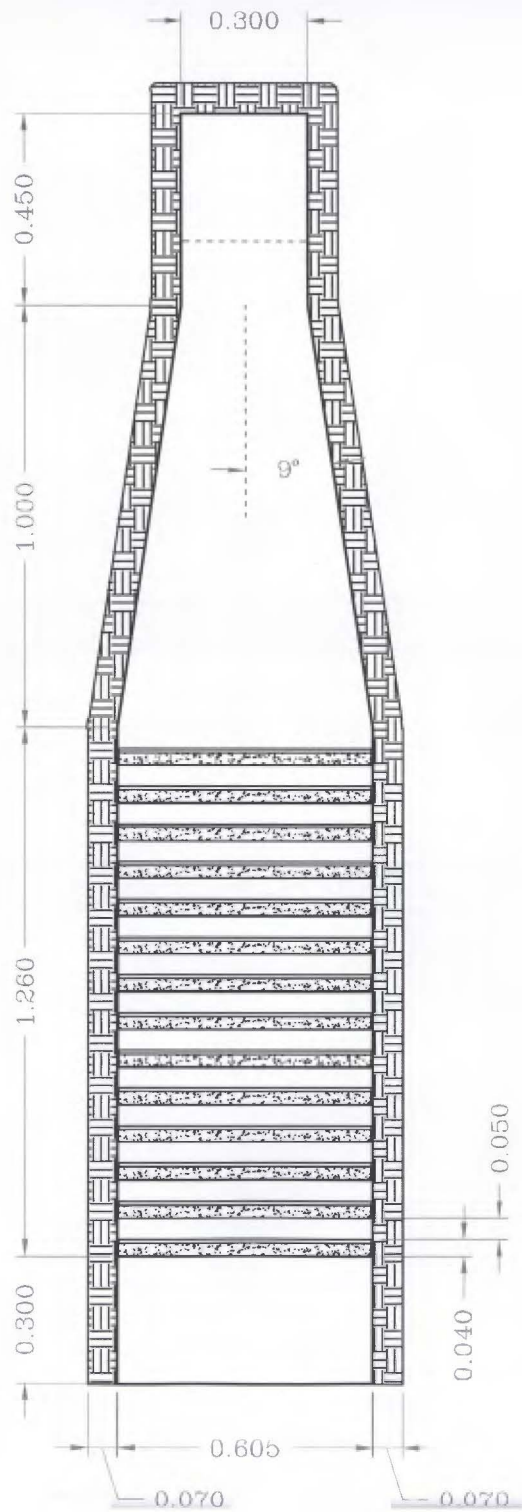
VISTA FRONTAL
DEL SECADOR



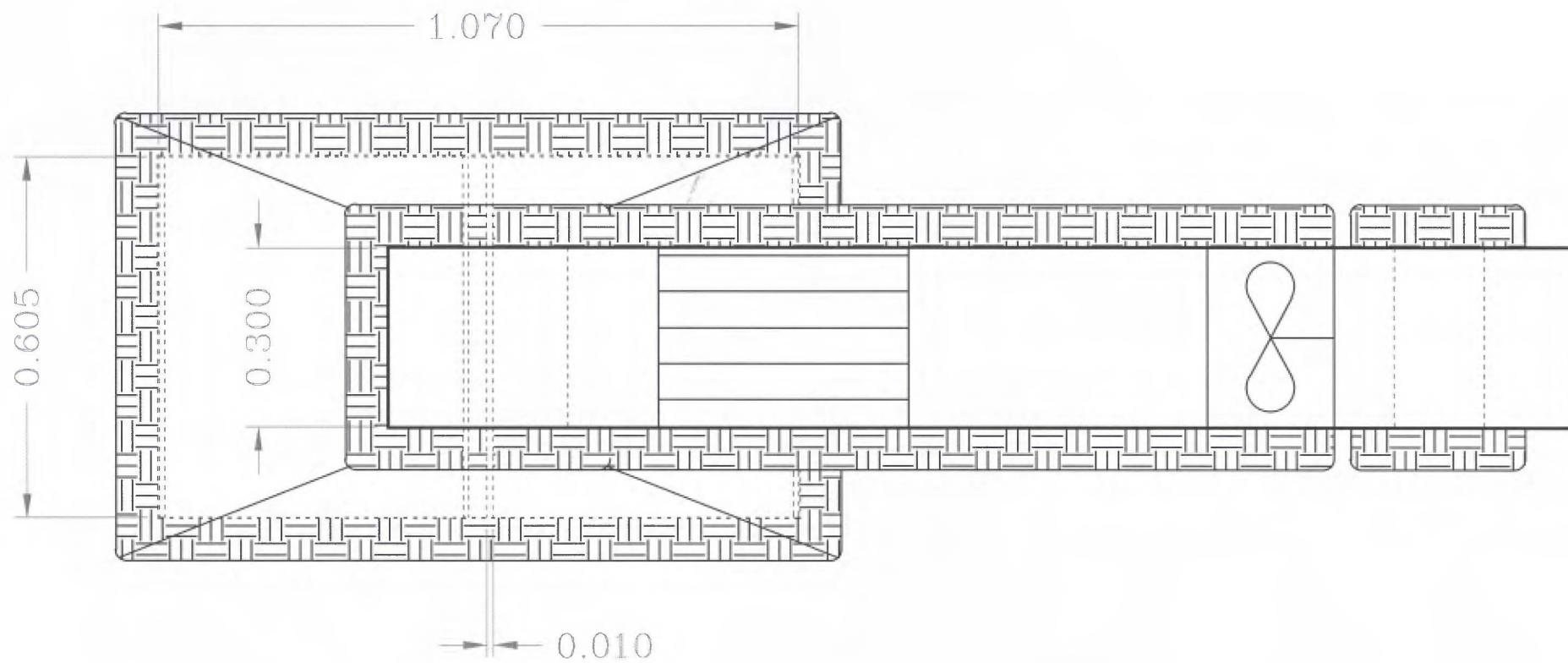
VISTA LATERAL DERECHA
DEL SECADOR



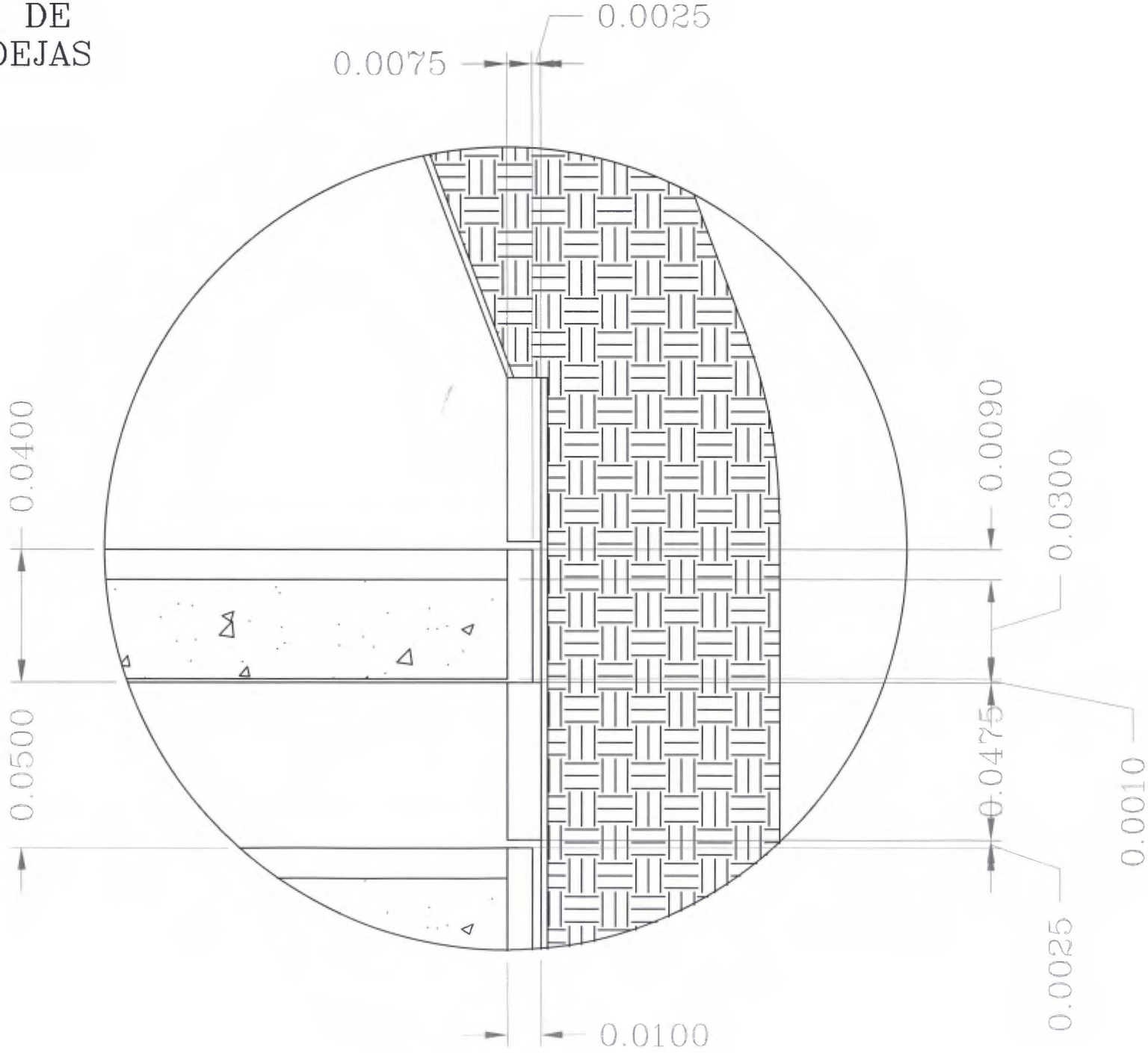
VISTA LATERAL IZQUIERDA
DEL SECADOR

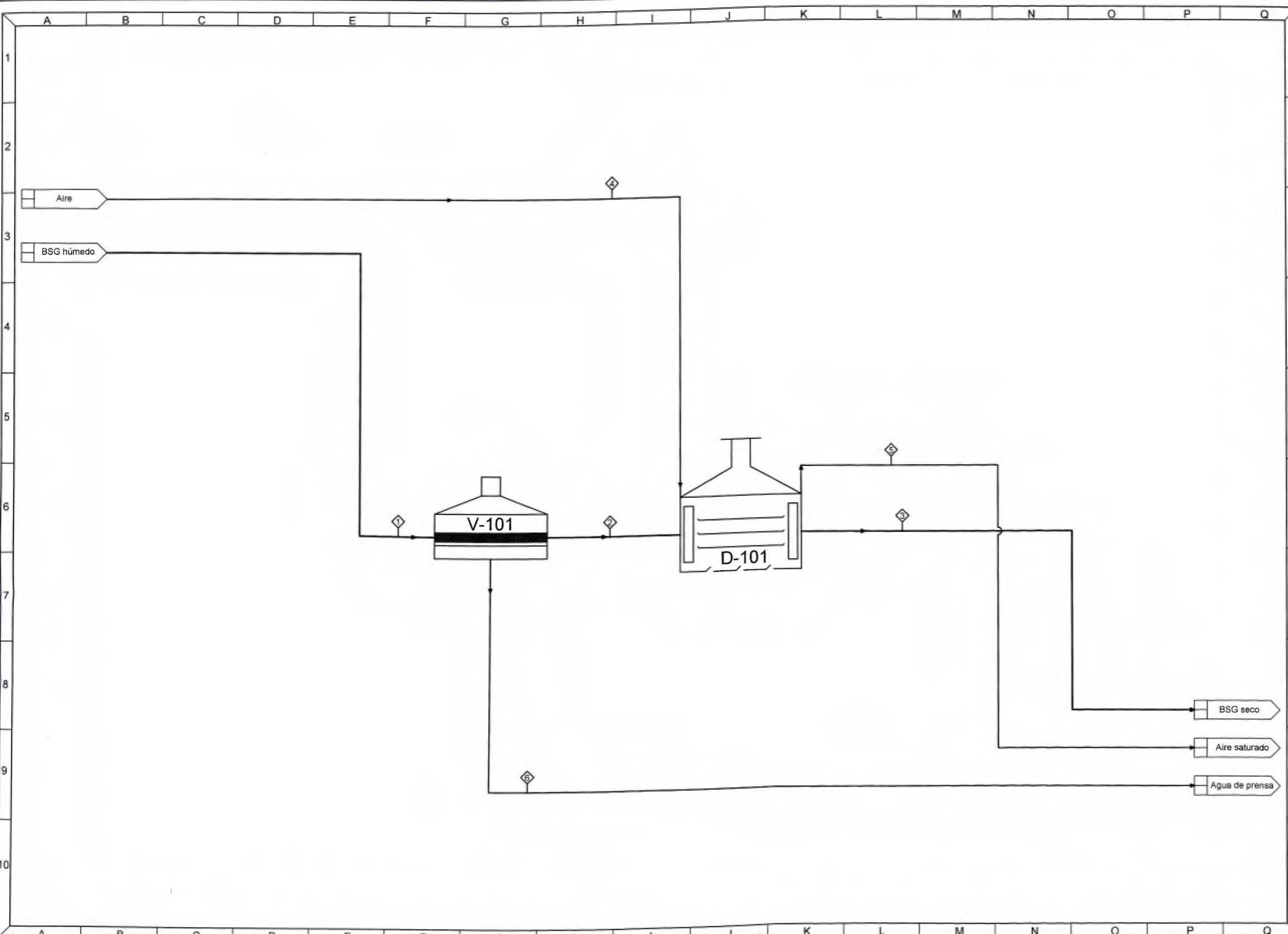


VISTA SUPERIOR
DEL SECADOR



DETALLE DE
LAS BANDEJAS





NOMENCLATURA			SELLOS DE APROBACIÓN
IDEM	DESCRIPCIÓN	ZONA	
D-101	Secador	J-5	
V-101	Presna hidráulica	G-6	

APROBACIÓN COMISIÓN REVISORA DE PERMISOS DE CONSTRUCCIÓN

PROYECTO:
Proceso de secado de granos gastados de cebada

PROVINCIA: Heraido	CANTÓN: Santa Bárbara	DISTRITO: Santa Bárbara
-----------------------	--------------------------	----------------------------

Dibujó: Dania Cienereo Arias
Firmó:

PROFESIONAL RESPONSABLE
Dania Cienereo Arias

INFORMACIÓN REGISTRO PUBLICO
Propietario:
No. Catastro:

CONTENIDO:

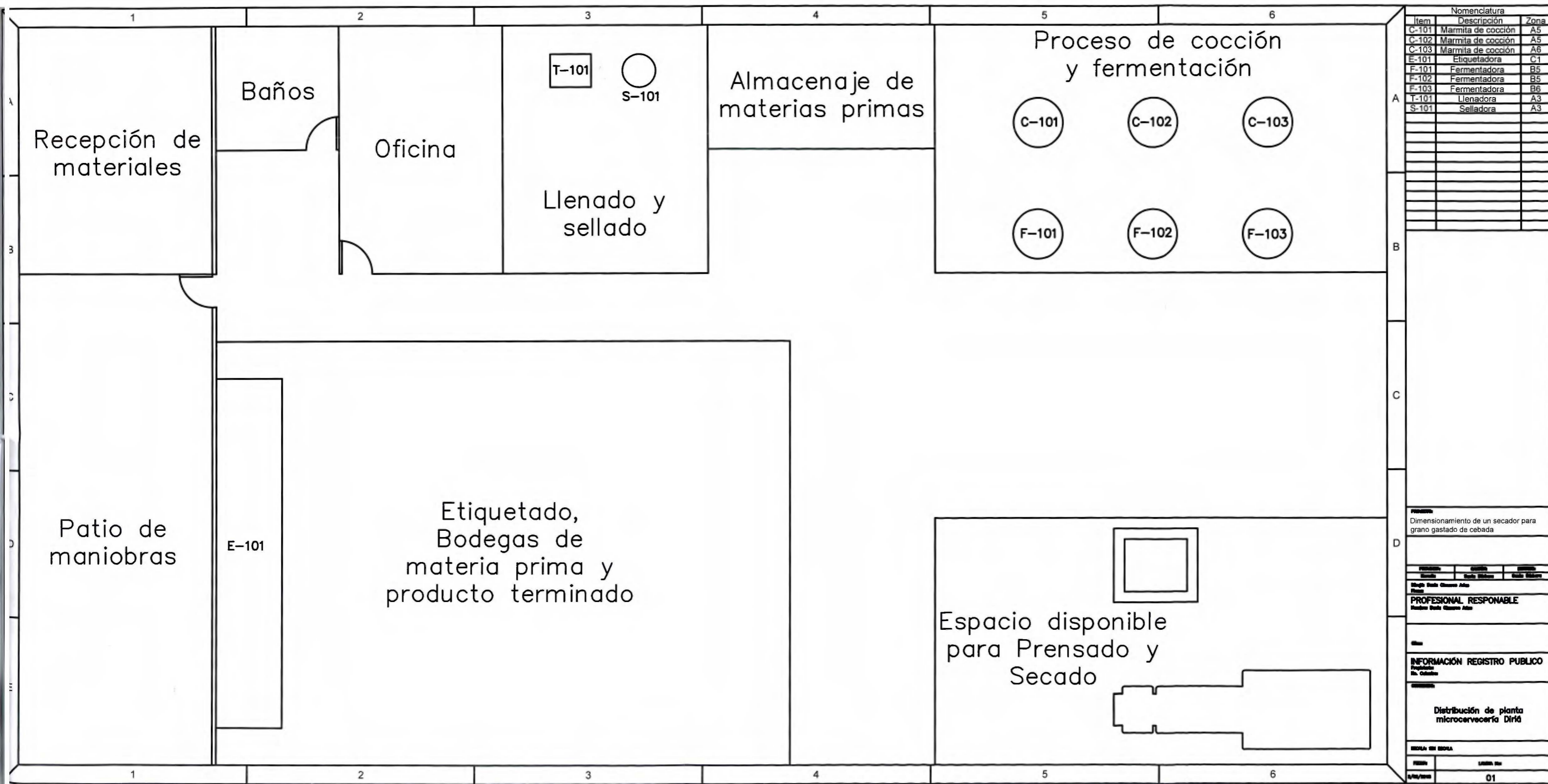
DFP del proceso de secado del grano gastado de cebada

ESCALA: SIN ESCALA

FECHA: 1/05/2018	LÁMINA No: DFP-01
---------------------	----------------------

CUADRO DE BALANCE

NOMBRE DEL COMPONENTE	①	②	③	④	⑤	⑥			
	BSG húmedo	BSG prensado	BSG seco	Aire T. ambiente	Aire Saturado	Agua de prensa			
Temperatura, °C	25	25	60	25	29.8	25			
Flujo, kg/día	130	101.1	45.2	54993.6	55049.5	28.9			
Presión, kPa	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3			



Nomenclatura		
Item	Descripción	Zona
C-101	Marmita de cocción	A5
C-102	Marmita de cocción	A5
C-103	Marmita de cocción	A6
E-101	Etiquetadora	C1
F-101	Fermentadora	B5
F-102	Fermentadora	B5
F-103	Fermentadora	B6
T-101	Llenadora	A3
S-101	Selladora	A3

PROYECTO:
Dimensionamiento de un secador para grano gastado de cebada

PROYECTANTE	REVISADO	APROBADO

PROFESIONAL RESPONSABLE

INFORMACIÓN REGISTRO PÚBLICO

Distribución de planta microcervecera Dirlid

HORA EN HOJA	