

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
CALENTAMIENTO A GAS PARA EL SECADO DE
GRANOS EN LECHO ESTACIONARIO PARA “TRANS Y
COMERCIO GUERRA AYALA” Cía. LTDA.**

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Christian Fernando Guerra Ayala

Juan Carlos Jiménez Jaramillo

Sangolquí, 2005, julio 11.

CERTIFICACIÓN DEL PROFESOR DIRECTOR

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO A GAS PARA EL SECADO DE GRANOS EN LECHO ESTACIONARIO PARA “TRANS Y COMERCIO GUERRA AYALA” Cía. LTDA.” fue realizado en su totalidad por los señores Christian Fernando Guerra Ayala y Juan Carlos Jiménez Jaramillo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Guasumba.
Director del Proyecto

Ing. Ernesto Soria
Codirector del Proyecto

Quito, 20 de mayo 2005.

CERTIFICACIÓN

Por medio de la presente, Trans Comercio Guerra Ayala, certifica que el proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO A GAS PARA EL SECADO DE GRANOS EN LECHO ESTACIONARIO PARA “TRANS Y COMERCIO GUERRA AYALA” Cía. LTDA.” fue realizado en su totalidad por los señores Christian Fernando Guerra Ayala y Juan Carlos Jiménez Jaramillo a entera satisfacción de la Compañía. Los suscritos están autorizados para utilizar la presente como mejor convenga a sus intereses.

Mayo. (R). Fernando Guerra
GERENTE

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
CALENTAMIENTO A GAS PARA EL SECADO DE
GRANOS EN LECHO ESTACIONARIO PARA “TRANS Y
COMERCIO GUERRA AYALA” Cía. LTDA”

ELABORADO POR:

Sr. Christian Fernando Guerra Ayala.

Sr. Juan Carlos Jiménez Jaramillo.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DECANO

Sangolquí, 2005 – 07 - 04

DEDICATORIA

Este gran esfuerzo de mi vida, a mi esposa por su abnegada colaboración, paciencia y comprensión durante la tarea que nos impuso la necesidad de mi superación personal.

Christian

Dedico todo el esfuerzo para realizar este proyecto a mis padres y hermanos por su amor, comprensión y apoyo incondicionales. A Belén y a mis amigos que supieron impulsarme cada día hacia la consecución de este objetivo. Por todos ellos cada día es una nueva lucha por ser mejor ser humano.

Juan Carlos

AGRADECIMIENTO

En el cielo a Dios, que me permitió culminar con éxito esta tan soñada meta, a mis padres por haberme brindado la oportunidad de estudiar esta carrera, a mi esposa, a mi hermana, a Juan Carlos, a mis profesores, y a todas las personas que pusieron énfasis y colaboración durante el desarrollo de este trabajo.

Christian

Agradezco primeramente a Dios por sus bendiciones, a mis padres y hermanos por ser fuente de amor y ejemplo para superarme. A nuestros profesores y colaboradores en este proyecto, a Belén y a mis amigos: Christian, Jairo, Antonio, Fausto y Daniel por el apoyo decidido que he recibido para alcanzar con éxito esta meta tan anhelada.

Juan Carlos

ÍNDICES

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | 13 |
| LISTADO DE TABLAS..... | 17 |
| LISTADO DE FIGURAS..... | 20 |
| LISTADO DE ECUACIONES | 23 |
| LISTADO DE ANEXOS..... | 28 |
| NOMENCLATURA UTILIZADA | 31 |
| INTRODUCCIÓN | 33 |
| CAPÍTULO I | 39 |
| DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO | 39 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 39 |
| 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA..... | 40 |
| 1.3. SEÑALAMIENTO DE OBJETIVOS..... | 40 |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL..... | 40 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 40 |
| 1.4. ALCANCE..... | 41 |
| CAPÍTULO II..... | 43 |
| SECADORAS DE GRANOS | 43 |
| 2.1. ANÁLISIS DEL PROCESO DE SECADO | 45 |
| 2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES POR EL MÉTODO DE SECADO..... | 53 |
| 2.2.1. SECADORES NATURALES (MÉTODOS TRADICIONALES) | 53 |
| 2.2.1.1. SECADO AL SOL | 54 |
| 2.2.1.2. SECADO A LA SOMBRA | 56 |
| 2.2.1.3. HORNOS AHUMADORES..... | 56 |
| 2.2.1.4. FOGÓN..... | 57 |
| 2.2.2. SECADORES ARTIFICIALES (TECNOLOGÍAS MEJORADAS)..... | 58 |
| 2.2.2.1. SECADORAS SOLARES DIRECTAS..... | 58 |
| 2.2.2.1.1. SECADORA DE GABINETE (TIPO BRACE O LAWAND) | 60 |
| 2.2.2.1.2. SECADORA PROVISTA DE UN AMPLIO PASAJE CENTRAL | 62 |
| 2.2.2.1.3. SECADORA TIPO TIENDA DE CAMPAÑA | 62 |
| 2.2.2.2. SECADORAS SOLARES INDIRECTAS | 64 |

| | |
|--|-----|
| 2.2.2.2.1. SECADORA INDIRECTA TIPO CHIMENEA CON CAPACIDAD PARA UNA TONELADA..... | 66 |
| 2.2.2.2.2. SECADORA TIPO COLECTOR SOLAR (SECADORA INDIRECTA "NUEVO MÉXICO")..... | 67 |
| 2.2.2.2.3. SECADORA SOLAR DE BIOMASA McDOWEL CON AUXILIO DE COMBUSTIBLE..... | 69 |
| 2.2.2.2.4. SECADORA SOLAR DE AIRE FORZADO PARA CEREALES..... | 71 |
| 2.2.3. SECADORAS MIXTAS..... | 72 |
| 2.2.3.1. SECADORA SAMOA..... | 74 |
| 2.2.3.2. SECADORA DE BANDEJAS..... | 75 |
| 2.2.3.3. SECADORA POR TANDAS IRRI..... | 76 |
| 2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES POR EL FLUJO DEL PRODUCTO..... | 78 |
| 2.3.1. SECADORES ESTACIONARIOS..... | 78 |
| 2.3.1.1. SECADOR DE LECHO FIJO O DE CAPA ESTACIONARIA..... | 78 |
| 2.3.1.1.1. DIMENSIONES DEL SECADOR..... | 82 |
| 2.3.1.1.2. CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR..... | 83 |
| 2.3.1.1.3. CÁMARA DE SECADO Y CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE..... | 84 |
| 2.3.1.1.4. CAMPANA DIFUSORA..... | 85 |
| 2.3.1.1.5. FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO DEL SECADOR DE LECHO FIJO..... | 86 |
| 2.3.1.2. SECADOR CON AIRE MOVIDO POR CONVECCIÓN NATURAL..... | 88 |
| 2.3.2. SECADORES CONTINUOS..... | 94 |
| 2.3.2.1. SECADORES EN CASCADA O DE CANALETAS..... | 94 |
| 2.3.2.2. SECADOR DE FLUJOS CRUZADOS..... | 97 |
| 2.3.2.3. SECADOR DE FLUJOS PARALELOS..... | 102 |
| 2.3.2.4. SECADOR DE FLUJOS CONTRACORRIENTES..... | 106 |
| 2.3.3. SECADORES INTERMITENTES..... | 107 |
| 2.3.3.1. SECADO COMBINADO..... | 109 |
| 2.3.3.2. SECA-AIREACIÓN DE GRANOS..... | 110 |
| 2.4. PARÁMETROS DEL SECADO DE GRANOS..... | 115 |
| 2.4.1. CONDICIONES DEL AIRE AMBIENTE..... | 115 |
| 2.4.2. CONDICIONES DEL GRANO..... | 118 |
| 2.4.2.1. CONTENIDO DE HUMEDAD..... | 118 |
| 2.4.2.2. ESFUERZO DE ROMPIMIENTO Y GRANOS ROTOS..... | 120 |
| 2.4.2.3. VALOR NUTRICIONAL..... | 120 |
| 2.4.2.4. VIABILIDAD DEL GRANO..... | 120 |
| 2.4.2.5. CRECIMIENTO DE BACTERIAS..... | 120 |
| 2.4.2.6. APARIENCIA Y PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS..... | 121 |
| 2.4.2.7. DENSIDAD VOLUMÉTRICA..... | 121 |
| 2.4.2.8. CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN..... | 121 |
| 2.4.3. EFICIENCIA DEL SECADO..... | 122 |
| 2.4.3.1. EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE CALOR SENSIBLE (EUCS):..... | 122 |
| 2.4.3.2. EFICIENCIA DE COMBUSTIBLE:..... | 122 |
| 2.4.3.3. EFICIENCIA DE SECADO:..... | 123 |

| | |
|---|------------|
| 2.4.4. TIEMPO DE SECADO: | 124 |
| 2.5. TRANSFERENCIA DE CALOR EN LECHO FLUIDO | 125 |
| 2.5.1. IMPERFECCIONES DE LA FLUIDIZACIÓN: | 128 |
| 2.5.2. VARIABLES DEL PROCESO DE FLUIDIZACIÓN | 130 |
| 2.5.2.1. VACUEDAD DEL LECHO (ϵ) | 130 |
| 2.5.2.2. VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL FLUIDO (U_0, U_T) | 131 |
| 2.5.2.3. DIÁMETRO PROMEDIO DE LA PARTÍCULA (D) | 132 |
| 2.5.2.4. VISCOSIDAD ABSOLUTA DEL FLUIDO (μ) | 132 |
| 2.5.2.5. CAÍDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL LECHO (ΔP) | 132 |
| 2.5.3. FASES DE LA FLUIDIZACIÓN | 133 |
| CAPÍTULO III..... | 135 |
| DISEÑO DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA | 135 |
| 3.1. PARÁMETROS DE DISEÑO | 135 |
| 3.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL | 138 |
| 3.1.2. ESTRUCTURA DEL GRANO | 138 |
| 3.1.3. APLICACIONES | 140 |
| 3.1.4. PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL GRANO | 141 |
| 3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SUBSISTEMAS | 150 |
| 3.2.1. CÁMARA DE SECADO | 150 |
| 3.2.2. LÁMINA CHAPA PERFORADA. | 150 |
| 3.2.3. CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE | 150 |
| 3.2.4. SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AIRE | 151 |
| 3.2.5. VENTILADOR..... | 154 |
| 3.2.6. MOTOR..... | 155 |
| 3.3. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DEL LECHO ESTACIONARIO | 159 |
| 3.3.1. CÁMARA DE SECADO | 159 |
| 3.3.2. CHAPA PERFORADA. | 165 |
| 3.3.3. CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE | 176 |
| 3.3.4. SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AIRE | 184 |
| 3.3.5. VENTILADOR..... | 202 |
| 3.3.6. MOTOR..... | 211 |
| 3.4. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA | 223 |
| 3.4.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS..... | 223 |
| 3.5. PROGRAMA DE PRUEBAS | 228 |
| 3.5.1. TIPOS DE PRUEBAS..... | 228 |
| 3.5.2. MÉTODOS | 229 |
| 3.5.3. PARÁMETROS | 232 |
| 3.5.4. EQUIPOS E INSTRUMENTOS..... | 233 |
| 3.5.5. DESARROLLO DE FORMATOS Y REGISTROS | 234 |

| | |
|---|------------|
| 3.5.6. EVALUACIÓN FINAL | 236 |
| 3.6. DISEÑO DE PLANOS CONSTRUCTIVOS | 236 |
| 3.7. DISEÑO DE LA IMPLEMENTACIÓN | 236 |
| CAPÍTULO IV..... | 237 |
| CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO..... | 237 |
| 4.1. ADECUACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS EXISTENTES | 237 |
| 4.2. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE EQUIPOS | 237 |
| 4.3. INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS..... | 238 |
| 4.4. PRUEBAS DE EVALUACIÓN EN FUNCIONAMIENTO | 238 |
| CAPÍTULO V | 247 |
| ESTUDIO ECONÓMICO FINANCIERO..... | 247 |
| 5.1. ANÁLISIS DE COSTOS..... | 247 |
| 5.2. ANÁLISIS DE INGRESOS..... | 249 |
| 5.3. FLUJO DE EFECTIVO NETO..... | 250 |
| 5.4. ÍNDICES FINANCIEROS | 250 |
| CONCLUSIONES | 253 |
| RECOMENDACIONES..... | 255 |
| RESUMEN..... | 257 |
| ANEXOS..... | 261 |
| ANEXO A. TABLAS E ILUSTRACIONES..... | 262 |
| ANEXO B. PSICROMETRÍA DEL PROCESO DE SECADO..... | 289 |
| ANEXO C. PLANOS | 291 |
| ANEXO D. MANUAL DE OPERACIÓN | 299 |
| ANEXO E. REPORTES DE PRUEBAS | 309 |
| ANEXO F. FOTOGRAFÍAS | 317 |
| BIBLIOGRAFÍA | 323 |

LISTADO DE TABLAS

CAPÍTULO II

| | |
|---|-----|
| TABLA 2. 1. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA DEL AIRE. | 45 |
| TABLA 2. 2. ALGUNAS PROPIEDADES DE ALIMENTOS | 47 |
| TABLA 2. 3. CANTIDAD DE HUMEDAD EN AIRE. | 48 |
| TABLA 2. 4. CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO (EMC)..... | 50 |
| TABLA 2. 5. RECOMENDACIONES PARA EL SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN LECHO FIJO. | 81 |
| TABLA 2. 6. EQUIVALENCIAS ENTRE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (Hh) Y HUMEDAD EN BASE SECA (Hs) 118 | |
| TABLA 2. 7. PÉRDIDA DE HUMEDAD DURANTE EL SECADO. | 119 |
| TABLA 2. 8. CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN PARA EL MAÍZ. | 121 |
| TABLA 2. 9. EFICIENCIA DE DISTINTOS SECADORES | 123 |
| TABLA 2. 10. VARIABLES DEL PROCESO DE FLUIDIZACIÓN. | 130 |
| TABLA 2. 11. NÚMERO DE REYNOLDS..... | 132 |

CAPÍTULO III

| | |
|---|-----|
| TABLA 3. 1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MAÍZ. | 138 |
| TABLA 3. 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MAÍZ. | 140 |
| TABLA 3. 3. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL MAÍZ Y DEL PROCESO DE SECADO. | 143 |
| TABLA 3. 4. CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO DEL MAÍZ PARA DIFERENTES TEMPERATURAS..... | 143 |
| TABLA 3. 5. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL DEL EMC | 144 |
| TABLA 3. 6. EMC A 80 C, HR=10% | 146 |
| TABLA 3. 7. CONDICIONES AMBIENTALES EN SAN ANTONIO DE PICHINCHA. | 147 |
| TABLA 3. 8. PODER CALÓRICO DE COMBUSTIBLES | 153 |
| TABLA 3. 9. TIPO DE TRANSMISIÓN. | 158 |
| TABLA 3. 10. DIMENSIONES GENERALES DE LA CÁMARA DE SECADO. | 159 |
| TABLA 3. 11. VALORES MEDIDOS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MAÍZ..... | 161 |
| TABLA 3. 12. VALORES CALCULADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MAÍZ. | 163 |
| TABLA 3. 13. CÁLCULO DEL PESO DE LA PLANCHA DE ACERO DE 1/16 [PLG]. | 168 |
| TABLA 3. 14. CÁLCULO DEL PESO DE LAS VIGAS (VARILLAS 3/8"). | 169 |
| TABLA 3. 15. CÁLCULO DEL PESO DE LAS VIGAS (VARILLAS 1/2"). | 170 |
| TABLA 3. 16. CÁLCULO DEL PESO DEL MARCO DE ACERO (PERFIL L 1"x1"x1/8"). | 171 |
| TABLA 3. 17. CÁLCULO DEL PESO DE LAS COLUMNAS (VARILLAS 1/2"). | 172 |
| TABLA 3. 18. CARGA TOTAL APLICADA A LA ESTRUCTURA QUE SOPORTA EL MAÍZ..... | 173 |
| TABLA 3. 19. CONDICIONES DE APOYO DE COLUMNAS LARGAS | 174 |
| TABLA 3. 20. ANÁLISIS ESTÁTICO DE LAS COLUMNAS, SEGÚN EC. EULER. | 176 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 3. 21 PÉRDIDAS DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL SECADOR | 183 |
| TABLA 3. 22. PÉRDIDAS DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL SECADOR..... | 184 |
| TABLA 3. 23.CÁLCULOS PSICROMÉTRICOS . ESTADO 1. | 185 |
| TABLA 3. 24.CONDICIONES AIRE – ESTADO 1..... | 185 |
| TABLA 3. 25.CÁLCULOS PSICROMÉTRICOS - ESTADO 2..... | 187 |
| TABLA 3. 26.CONDICIONES AIRE – ESTADO 2..... | 187 |
| TABLA 3. 27. CALOR PERDIDO..... | 190 |
| TABLA 3. 28.CÁLCULOS PSICROMÉTRICOS - ESTADO 3..... | 195 |
| TABLA 3. 29.CONDICIONES AIRE – ESTADO 3..... | 195 |
| TABLA 3. 30. PROPIEDADES DEL AGUA (ENTALPÍA) | 195 |
| TABLA 3. 31. BALANCE TÉRMICO. | 196 |
| TABLA 3. 32. ERRORES - ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD..... | 198 |
| TABLA 3. 33. MODELOS Y CAPACIDADES DE QUEMADORES DE GAS MEPHISTO..... | 200 |
| TABLA 3. 34 PARÁMETROS TÉCNICOS | 202 |
| TABLA 3. 35. PÉRDIDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL LECHO..... | 204 |
| TABLA 3. 36 LOGARITMOS DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN EN EL LECHO..... | 205 |
| TABLA 3. 37. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL LECHO (ESCALA LOGARÍTMICA). | 207 |
| TABLA 3. 38. CABEZA DE PÉRDIDA DE PRESIÓN $HLT A_{0,18 M/S}$ | 208 |
| TABLA 3. 39. PÉRDIDAS DE PRESIÓN TOTALES A TRAVÉS DEL SISTEMA..... | 209 |
| TABLA 3. 40.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS VENTILADORES BP..... | 210 |
| TABLA 3. 41.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MOTORES ISUZU | 221 |
| TABLA 3. 42.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PRODUCTO. | 223 |
| TABLA 3. 43. CÁMARA DE SECADO, CHAPA PERFORADA Y CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE..... | 224 |
| TABLA 3. 44.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS VENTILADOR. | 224 |
| TABLA 3. 45. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL QUEMADOR DE GAS TIPO TOBERA QG – 3. | 225 |
| TABLA 3. 46. ESPECIFICACIONES DEL MOTOR C 190. | 225 |
| TABLA 3. 47.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO..... | 227 |
| TABLA 3. 48. MUESTRA PILOTO PARA EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MAÍZ. | 230 |
| TABLA 3. 49. EQUIPOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS. | 233 |

CAPÍTULO IV

| | |
|---|-----|
| TABLA 4. 1. F1 – B – FORMATO DE REGISTRO DE MUESTRA. | 239 |
| TABLA 4. 2. FACTORES PARA DIAGRAMAS DE CONTROL..... | 240 |
| TABLA 4. 3. F2 - HOJA DE REGISTRO DE DATOS DEL PROCESO DE SECADO. | 242 |
| TABLA 4. 4. F3 - HOJA DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE DE CÁLCULO. | 243 |
| TABLA 4. 5.FORMATO DE REGISTRO DE MUESTRA CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL DEL MAÍZ (%) | 244 |

CAPÍTULO V

| | |
|---|-----|
| TABLA 5. 1. INVERSIÓN SECADORA..... | 248 |
| TABLA 5. 2.COSTOS DE OPERACIÓN COMERCIALIZACIÓN MAÍZ SECO | 248 |
| TABLA 5. 3. NUEVOS COSTOS DE OPERACIÓN | 249 |
| TABLA 5. 4. FLUJO DE EFECTIVO CONSIDERANDO INGRESOS TOTALES ANUALES. | 249 |
| TABLA 5. 5. FLUJO NETO DE EFECTIVO ANUAL DE LA OPERACIÓN DE SECADO. | 250 |
| TABLA 5. 6. VALOR ACTUAL NETO..... | 251 |
| TABLA 5. 7. TASA INTERNA DE RENDIMIENTO (TIR) | 252 |

LISTADO DE FIGURAS

CAPÍTULO II

| | |
|---|----|
| FIGURA 2. 1. CURVAS DE SECADO Y TASA DE SECADO. | 49 |
| FIGURA 2. 2. ZONAS DE SECADO EN EL LECHO. | 51 |
| FIGURA 2. 3. SECADO DE ALIMENTOS AL SOL SOBRE ESTERAS. | 55 |
| FIGURA 2. 4. SECADO DE ALIMENTOS A LA SOMBRA. | 56 |
| FIGURA 2. 5. SECADO DE ALIMENTOS AL CALOR DE UN FOGÓN. | 57 |
| FIGURA 2. 6. SECADORA TIPO TIENDA DE CAMPAÑA. | 59 |
| FIGURA 2. 7. SECADORA SOLAR DE BANDEJA CORREDIZA. | 59 |
| FIGURA 2. 8. SECADORA BAJO UN TECHO PROTECTOR. | 59 |
| FIGURA 2. 9. SECADORA TIPO GABINETE. | 60 |
| FIGURA 2. 10. SECADORA CON PASAJE CENTRAL. | 62 |
| FIGURA 2. 11. SECADORA TIPO TIENDA DE CAMPAÑA. | 63 |
| FIGURA 2. 12. SECADORA TIPO CHIMENEA. | 66 |
| FIGURA 2. 13. SECADORA TIPO COLECTOR SOLAR. | 68 |
| FIGURA 2. 14. SECADORA SOLAR DE BIOMASA. | 70 |
| FIGURA 2. 15. SECADORA SOLAR DE AIRE FORZADO. | 71 |
| FIGURA 2. 16. SECADORA SAMOA. | 74 |
| FIGURA 2. 17. SECADORA POR TANDAS. | 76 |
| FIGURA 2. 18. INTERCAMBIADOR DE CALOR BENSON. | 77 |
| FIGURA 2. 19. SECADOR DE LECHO FIJO. | 79 |
| FIGURA 2. 20. RESISTENCIA DE GRANOS Y SEMILLAS AL PASO DEL AIRE. | 83 |
| FIGURA 2. 21. CÁMARA DE SECADO Y CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DEL AIRE EN EL SECADOR DE LECHO FIJO. | 85 |
| FIGURA 2. 22. ÁNGULO DE ABERTURA DEL ELEMENTO DE TRANSICIÓN, ENTRE LA CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DEL AIRE Y EL VENTILADOR DEL SECADOR DE LECHO FILO. | 86 |
| FIGURA 2. 23. ESQUEMA DEL SECADOR CON AIRE MOVIDO POR CONVECCIÓN NATURAL (BROOK, 1964 AB). | 89 |
| FIGURA 2. 24. ESQUEMA DEL SECADOR CON AIRE MOVIDO POR CONVECCIÓN NATURAL (BERNAL, 1982). | 90 |
| FIGURA 2. 25. ESQUEMA DEL SECADOR CON AIRE MOVIDO POR CONVECCIÓN NATURAL (BERNAL, 1982). | 91 |
| EN LA FIGURA 2. 26. SECADOR CON AIRE MOVIDO POR CONVECCIÓN NATURAL. | 92 |
| FIGURA 2. 27. ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE CANALETAS PARALELAS EN SECADORES DE TIPO CASCADA. | 95 |
| FIGURA 2. 28. ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE CANALETAS EN UN SECADOR DE CANALETAS CRUZADAS (KREYGER 1972). | 95 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 2. 29. . ESQUEMAS DE SECADORES DE FLUJOS CRUZADOS DE TIPO TORRE. | 97 |
| FIGURA 2. 30. ESQUEMA DE SECADORES DE FLUJOS CRUZADOS..... | 98 |
| FIGURA 2. 31. ESQUEMA DE UN SECADOR DE FLUJOS CRUZADOS DE CONSTRUCCIÓN HORIZONTAL DE VARIAS ETAPAS. | 99 |
| FIGURA 2. 32. DIAGRAMA DE UN SECADOR DE FLUJOS CRUZADOS CON INVERSIÓN Y RECIRCULACIÓN DE AIRE (BROOKER ET AL., 1977)..... | 101 |
| FIGURA 2. 33. . ESQUEMA DEL DISPOSITIVO PARA ALTERNAR LA POSICIÓN DE LOS GRANOS EN LAS COLUMNAS DE LOS SECADORES DE FLUJOS CRUZADOS..... | 101 |
| FIGURA 2. 34. DIAGRAMA DE UN SECADOR DE FLUJOS CRUZADOS CON INVERSIÓN Y RECIRCULACION DE PARTE DEL AIRE DE SECADO Y CON ZONAS DE DESCANSO (DALPASQUALE, 1981)..... | 102 |
| FIGURA 2. 35. ESQUEMA DE SECADOR DE FLUJOS PARALELOS. | 103 |
| FIGURA 2. 36. ESQUEMA DE SECADOR DE FLUJOS PARALELOS DE TRES ETAPAS, CON ENFRIADOR EN FLUJOS CONTRARIOS..... | 105 |
| FIGURA 2. 37. SECADO EN FLUJOS CONTRARIOS, EN SILOS..... | 106 |
| FIGURA 2. 38. ESQUEMA DE UN SECADOR INTERMITENTE DE FLUJOS CRUZADOS. | 108 |
| FIGURA 2. 39. SILO DE SECA -AIREACIÓN..... | 110 |
| FIGURA 2. 40. CARTAS PSICROMÉTRICAS | 115 |
| FIGURA 2. 41. CAMBIOS DE LAS CONDICIONES DEL AIRE DURANTE EL SECADO. | 116 |
| FIGURA 2. 42.RESISTENCIA AL FLUJO DE AIRE DE GRANOS Y SEMILLAS. | 117 |
| FIGURA 2. 43. FASES DEL PROCESO DE FLUIDIZACIÓN. | 134 |
| FIGURA 2. 44. RESISTENCIA DE GRANOS Y SEMILLAS AL PASO DEL AIRE. | 203 |

CAPÍTULO III

| | |
|---|-----|
| FIGURA 3. 1. ESTRUCTURA ESQUEMÁTICA DEL GRANO DE MAÍZ. | 139 |
| FIGURA 3. 2. CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO (EMC) CON HUMEDAD RELATIVA DE 10% | 146 |
| FIGURA 3. 3. FAMILIA DE CURVAS DEL EMC A DIFERENTES HUMEDADES RELATIVAS..... | 147 |
| FIGURA 3. 4. TIEMPO RECOMENDADO DE ALMACENAMIENTO DEL MAÍZ..... | 149 |
| FIGURA 3. 5. QUEMADOR TIPO TOBERA. | 154 |
| FIGURA 3. 6. VENTILADOR CENTRÍFUGO. | 155 |
| FIGURA 3. 7. DIAGRAMA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA. | 156 |
| FIGURA 3. 8. DIAGRAMA DE LA CÁMARA DE SECADO. | 159 |
| FIGURA 3. 9. DIAGRAMA CHAPA PERFORADA..... | 165 |
| FIGURA 3. 10. SECCIÓN DE PLACA PERFORADA DE 0,5 [M] X 0,5 [M]. | 166 |
| FIGURA 3. 11. CONDICIONES DE APOYO DE COLUMNAS LARGAS..... | 174 |
| FIGURA 3. 12.VISTA EN PERSPECTIVA DE LA CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE..... | 176 |
| FIGURA 3. 13. VISTA SUPERIOR DE LOS CAMBIOS DE SECCIÓN TRANSVERSAL..... | 177 |
| FIGURA 3. 14. VISTA SUPERIOR DE LA CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE. | 177 |
| FIGURA 3. 15. VISTA LATERAL DE LA CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE. | 177 |
| FIGURA 3. 16. DILATACIÓN GRADUAL..... | 181 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 3. 17. CONTRACCIÓN GRADUAL | 181 |
| FIGURA 3. 18. DILATACIÓN SÚBITA..... | 182 |
| FIGURA 3. 19. CALENTAMIENTO AIRE, TRANSICIÓN ESTADO 1 – 2..... | 186 |
| FIGURA 3. 20. DIMENSIONES DE LA PARED DE LA CÁMARA DE SECADO [MM]. | 188 |
| FIGURA 3. 21. TRANSFERENCIA CALOR, SECADO DEL GRANO, TRANSICIÓN ESTADO 2 – 3..... | 191 |
| FIGURA 3. 22. PÉRDIDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL LECHO..... | 204 |
| FIGURA 3. 23. PÉRDIDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL LECHO (ESCALA LOGARÍTMICA)..... | 205 |
| FIGURA 3. 24. CURVAS DE RENDIMIENTO DE VARIOS MODELOS DE VENTILADORES BP - AL CON CAMPANA DIFUSORA. | 209 |
| FIGURA 3. 25. CURVAS DE RENDIMIENTO DE VENTILADORES BP - AL CON CAMPANA DIFUSORA. | 211 |
| FIGURA 3. 26. FACTOR DE SERVICIO (BANDAS) (TABLE 1)..... | 211 |
| FIGURA 3. 27. SELECCIÓN TIPO DE BANDA..... | 212 |
| FIGURA 3. 28. PRINCIPALES DIMENSIONES POLEAS | 213 |
| FIGURA 3. 29. POTENCIA POR BANDA. | 214 |
| FIGURA 3. 30. LONGITUD ESTÁNDAR DE BANDAS. | 216 |
| FIGURA 3. 31. TOLERANCIAS DE INSTALACIÓN Y FACTORES K DE CORRECCIÓN. | 217 |
| FIGURA 3. 32. ANCHO RECOMENDADO PARA POLEAS..... | 218 |
| FIGURA 3. 33. CURVA DE COMPORTAMIENTO DEL MOTOR ISUZU C 190..... | 220 |
| FIGURA 3. 34. HIDRÓMETRO | 233 |
| FIGURA 3. 35. FORMATO (F2) DE REGISTRO DE DATOS DEL PROCESO DE SECADO. | 234 |
| FIGURA 3. 36. FORMATO (F3) - HOJA DE EVALUACIÓN DE SOFTWARE DE CÁLCULO..... | 234 |
| FIGURA 3. 37. FORMATO (F4) -REGISTRO Y CONTROL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL..... | 235 |
| FIGURA 3. 38. REGISTRO Y CONTROL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL..... | 235 |

LISTADO DE ECUACIONES

CAPÍTULO II

| | | |
|---|----------------------|-----|
| $A = \frac{m}{P_p \cdot H}$ | ECUACIÓN 2. 1. | 82 |
| $ma = m_a \cdot A$ | ECUACIÓN 2. 2. | 82 |
| $EUCS = SHUE = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor sensible total en el aire de secado}}$ | ECUACIÓN 2.3. | 122 |
| $\text{Eficiencia de combustible} = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor suministrado por el combustible}}$ | ECUACIÓN 2. 4. | 122 |
| $\text{Eficiencia de secado} = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor disponible para remoción de humedad}}$ | ECUACIÓN 2. 5. | 123 |
| $u_o = \frac{Co.g.d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot (1 - \varepsilon_o)}{\mu}$ | ECUACIÓN 2. 6. | 131 |
| $u_t = \frac{Ct.g.d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\mu}$ | ECUACIÓN 2. 7. | 131 |
| $\frac{U}{U_t} = \varepsilon^n$ | ECUACIÓN 2. 8. | 131 |
| $\Delta P = h(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f)$ | ECUACIÓN 2. 9. | 132 |
| $\Delta P = h \cdot \rho_s \cdot (1 - \varepsilon)$ | ECUACIÓN 2. 10. | 133 |
| $Fr = \frac{U^2}{d \cdot g}$ | ECUACIÓN 2. 11. | 133 |

CAPÍTULO III

| | | | |
|---|------------|---------------------|-----|
| $Densidad = \frac{\text{masa del producto}}{\text{volumen del producto}}$ | $[g/cm^3]$ | ECUACIÓN 3. 1. | 142 |
|---|------------|---------------------|-----|

$$Porosidad = 1 - \left[\frac{\text{densidad aparente}}{\text{densidad real}} \right] \times 100[\%] \quad \text{ECUACIÓN 3. 2} \dots\dots\dots 142$$

$$Y = a \pm b.X \quad \text{ECUACIÓN 3. 3} \dots\dots\dots 144$$

$$\sum Y = n.a \pm b. \sum X \quad \text{ECUACIÓN 3. 4} \dots\dots\dots 144$$

$$\sum X.Y = a \sum X \pm b. \sum X^2 \quad \text{ECUACIÓN 3. 5} \dots\dots\dots 144$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} \quad \text{ECUACIÓN 3. 6} \dots\dots\dots 145$$

$$A = L.a \quad \text{ECUACIÓN 3. 7} \dots\dots\dots 160$$

$$V = A.H \quad \text{ECUACIÓN 3. 8} \dots\dots\dots 160$$

$$\delta r = \frac{m}{V_r} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad \text{ECUACIÓN 3. 9} \dots\dots\dots 161$$

$$\delta a = \frac{m}{V_a} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad \text{ECUACIÓN 3. 10} \dots\dots\dots 162$$

$$P = 1 - \left[\frac{\delta a}{\delta r} \right] \times 100[\%] \quad \text{ECUACIÓN 3. 11} \dots\dots\dots 162$$

$$m = \delta a.V_a [Kg] \quad \text{ECUACIÓN 3. 12} \dots\dots\dots 164$$

$$mw = \frac{m}{(1 - \varphi_2)} (\varphi_1 - \varphi_2) [Kg] \quad \text{ECUACIÓN 3. 13} \dots\dots\dots 164$$

$$As = Ls^2 \quad \text{ECUACIÓN 3. 14} \dots\dots\dots 166$$

$$Ap_u = \frac{\pi.D_p^2}{4} \quad \text{ECUACIÓN 3. 15} \dots\dots\dots 166$$

$$Ap_T = \# \text{ perforaciones} \times Ap \quad \text{ECUACIÓN 3. 16} \dots\dots\dots 167$$

$$Ae = As - Ap_T \quad \text{ECUACIÓN 3. 17} \dots\dots\dots 167$$

$$Ve = Ae \times e \quad \text{ECUACIÓN 3. 18} \dots\dots\dots 167$$

$$Ps = Ve \times \delta a \quad \text{ECUACIÓN 3. 19} \dots\dots\dots 167$$

$$Vv_1 = Av_1 \times Ls \quad \text{ECUACIÓN 3. 20} \dots\dots\dots 168$$

$$Vm = Am \times Ls \quad \text{ECUACIÓN 3. 21} \dots\dots\dots 170$$

$$Vc = Ac \times Ls \quad \text{ECUACIÓN 3. 22} \dots\dots\dots 171$$

$$Pg_U = \frac{m}{A}.As \quad \text{ECUACIÓN 3. 23} \dots\dots\dots 172$$

$$Pm = Pg_U + Ps + Pv_1 + Pv_2 + Pp + Pc \quad \text{ECUACIÓN 3. 24} \dots\dots\dots 172$$

$$Pa = Pm + Pv \quad \text{ECUACIÓN 3. 25} \dots\dots\dots 173$$

| | | |
|--|----------------------|-----|
| $\lambda = \frac{k.L}{r}$ | ECUACIÓN 3. 26 | 174 |
| $P_{cr} = \frac{\pi^2 .E.I}{L^2}$ | ECUACIÓN 3. 27 | 175 |
| $A_i = a_i \times b_i$ | ECUACIÓN 3. 28 | 178 |
| $v_i = \frac{Q}{A_i}$ | ECUACIÓN 3. 29 | 179 |
| $De_i = \frac{1,3(a_i \times b_i)^{5/8}}{(a_i + b_i)^{1/4}}$ | ECUACIÓN 3. 30 | 179 |
| $\frac{D_2}{D_1} = \frac{\text{Diámetro equivalente de salida de aire}}{\text{Diámetro equivalente de entrada de aire}}$ | ECUACIÓN 3. 31 | 180 |
| $\frac{D_1}{D_2} = \frac{\text{Diámetro equivalente de entrada de aire}}{\text{Diámetro equivalente de salida de aire}}$ | ECUACIÓN 3. 32 | 180 |
| $h_{Li} = K_{i-j} \cdot \left(\frac{v_i^2}{2.g} \right)$ | ECUACIÓN 3. 33 | 182 |
| $\dot{Q}_{\text{Perdido}} = A \times U \times \Delta T$ | ECUACIÓN 3. 34 | 188 |
| $U = \frac{1}{Rt}$ | | |
| $Rt = \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}$ | ECUACIÓN 3. 35 | 188 |
| $\dot{Q}_{\text{entrada}} = \dot{Q}_{\text{almacenado}} + \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{Q}_{\text{perdido}}$ | ECUACIÓN 3. 36 | 191 |
| $\frac{m a_2 \times h a_2}{v a_2} = \frac{m w \times h_{fg}}{t} + \frac{m a_3 \times h a_3}{v a_3} + \dot{Q}_{\text{perdido}}$ | ECUACIÓN 3. 37 | 191 |
| $m w_{\text{max}} = (\omega_3 - \omega_2) \times \frac{m a_2}{v a_2} \times t$ [Kg agua] | ECUACIÓN 3. 38 | 196 |
| $\text{Error} = \frac{(\text{Valor real} - \text{Valor teórico})}{\text{Valor teórico}} \times 100$ [%] | ECUACIÓN 3. 39 | 197 |
| $\text{Flujo de Calor}_{\text{requerido}} = (h_2 - h_1) \times \frac{m a_1}{v a_1}$ [Kg agua] | ECUACIÓN 3. 40 | 198 |

$$cc = \frac{\text{Flujo de Calor}_{\text{requerido}} \left[\frac{\text{KJ}}{\text{h}} \right] \times t \left[\text{h} \right] \left[\text{Tanques} \right]}{PC \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Tanque}} \right]} \quad \text{ECUACIÓN 3. 41199}$$

$$CC = \frac{cc}{t} \left[\frac{\text{Tanques}}{\text{h}} \right] \quad \text{ECUACIÓN 3. 42.....200}$$

$$SHUE = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor disponible para remoción de humedad}} \quad \text{ECUACIÓN 3. 43.....201}$$

$$\text{Eficiencia de combustible} = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor suministrado por el combustible}} \quad \text{ECUACIÓN 3. 44201}$$

$$Y = a.X^b \quad \text{ECUACIÓN 3. 45205}$$

$$\text{Log}(Y) = \text{Log}(a) + b.\text{Log}(X) \quad \text{ECUACIÓN 3. 46.....206}$$

$$\sum \text{Log}(Y) = n.\text{Log}(a) \pm b.\sum \text{Log}(X) \quad \text{ECUACIÓN 3. 47206}$$

$$\sum \text{Log}(X).\text{Log}(Y) = \text{Log}(a)\sum \text{Log}(X) \pm b.\sum \text{Log}(X)^2 \quad \text{ECUACIÓN 3. 48.....206}$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} \quad \text{ECUACIÓN 3. 49.....207}$$

$$PD = P_{\text{motor}} \times FS \quad \text{ECUACIÓN 3. 50212}$$

$$n = \frac{Dp_{\text{ventilador}}}{dp_{\text{motor}}} \quad \text{ECUACIÓN 3. 51213}$$

$$V_{\text{banda}} = \omega_{\text{motor}} \times \frac{dp_{\text{motor}}}{2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad \text{ECUACIÓN 3. 52213}$$

$$C_{\text{min}} = \frac{Dp + 3.dp}{2} \quad \text{ECUACIÓN 3. 53214}$$

$$Lp = 2.C_{\text{min}} + \frac{\pi}{2}(Dp + dp) + \frac{(Dp - dp)^2}{4.C_{\text{min}}} \quad \text{ECUACIÓN 3. 54.....215}$$

$$C_{\text{def}} = C_{\text{min}} + \frac{Lp_{\text{def}} - Lp}{2} \quad \text{ECUACIÓN 3. 55.....216}$$

$$Z = \frac{PD}{P_Z \times K_L \times K_\beta} \quad \text{ECUACIÓN 3. 56.....217}$$

$$P_{\text{motor}} = P_{\text{ventilador}} = P_{\text{operación}} \quad \text{ECUACIÓN 3. 57219}$$

$$P_{\text{operación}} = T_{\text{motor}} \times \omega_{\text{motor}} = T_{\text{ventilador}} \times \omega_{\text{ventilador}} \quad \text{ECUACIÓN 3. 58.....219}$$

| | | |
|---|---------------------|-----|
| $T_{\text{ventilador}} = \frac{P_{\text{operación}}}{\omega_{\text{ventilador}}} \quad [N.m]$ | ECUACIÓN 3. 59..... | 219 |
| $T_{\text{motor}} = \frac{P_{\text{operación}}}{\omega_{\text{motor}}} \quad [N.m]$ | | |
| $n_0 = \frac{(Z_0)^2 \cdot \sigma^2}{E_0^2}$ | ECUACIÓN 3. 60..... | 229 |
| $n = \frac{n_0 \times N}{n_0 + (N - 1)}$ | ECUACIÓN 3. 61..... | 230 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|---|---------------------|-----|
| $\mu = \bar{X} \pm t_{\alpha, gl} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$ | ECUACIÓN 4. 1..... | 239 |
| $LSC = \bar{X} + A_2 \cdot \bar{R}$ | ECUACIÓN 4. 2 | 241 |
| $LIC = \bar{X} - A_2 \cdot \bar{R}$ | ECUACIÓN 4. 3 | 241 |
| $LC = d_2 \cdot \bar{R}$ | ECUACIÓN 4. 4..... | 241 |
| $LSC = D_4 \cdot \bar{R}$ | ECUACIÓN 4. 5 | 241 |
| $LIC = D_3 \cdot \bar{R}$ | ECUACIÓN 4. 6..... | 241 |

CAPÍTULO V

| | | |
|---|--------------------|-----|
| $VAN = VAN_0 + VAN_1 + VAN_2 + \dots + VAN_n$ | ECUACIÓN 5.1 | 250 |
| $VAN = \frac{FE_0}{(1+k)^0} + \frac{FE_1}{(1+k)^1} + \frac{FE_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+k)^n}$ | ECUACIÓN 5.2..... | 251 |
| $VAN = 0 = \frac{FE_0}{(1+TIR)^0} + \frac{FE_1}{(1+TIR)^1} + \frac{FE_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+TIR)^n}$ | ECUACIÓN 5.3 | 252 |

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A. TABLAS E ILUSTRACIONES

| | |
|--|-----|
| ANEXO A. 1. DILATACIÓN GRADUAL | 262 |
| ANEXO A. 2. CONTRACCIÓN GRADUAL..... | 263 |
| ANEXO A. 3. DILATACIÓN SÚBITA..... | 264 |
| ANEXO A. 4. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MATERIALES | 265 |
| ANEXO A. 5. CURVAS DE RENDIMIENTO DE VARIOS MODELOS DE VENTILADORES BP - AL CON CAMPANA DIFUSORA. | 267 |
| ANEXO A. 6. CURVAS DE RENDIMIENTO DE VENTILADORES BP - AL CON CAMPANA DIFUSORA. | 268 |
| ANEXO A. 7. FACTOR DE SERVICIO (BANDAS)..... | 269 |
| ANEXO A. 8. CAPACIDAD TRANSMISIÓN BANDAS TIPO B | 270 |
| ANEXO A. 9. RELACIÓN DE TRANSMISIÓN..... | 271 |
| ANEXO A. 10. POTENCIA POR BANDA. | 272 |
| ANEXO A. 11. TOLERANCIAS DE INSTALACIÓN Y FACTORES K DE CORRECCIÓN. | 273 |
| ANEXO A. 12. LONGITUDES ESTÁNDAR..... | 274 |
| ANEXO A. 13. CURVA DE COMPORTAMIENTO DEL MOTOR ISUZU C 190 | 275 |
| ANEXO A. 14. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MOTORES ISUZU..... | 276 |
| ANEXO A. 15. DISTRIBUCIÓN NORMAL..... | 278 |
| ANEXO A. 16. DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT..... | 279 |
| ANEXO A. 17. FACTORES PARA DIAGRAMAS DE CONTROL. | 280 |
| ANEXO A. 18. F1 – FORMATO DE REGISTRO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD..... | 281 |
| ANEXO A. 19. F2 - HOJA DE REGISTRO DE DATOS DEL PROCESO DE SECADO | 282 |
| ANEXO A. 20. F3 - HOJA DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE DE CÁLCULO | 283 |
| ANEXO A. 21. F4 - HOJA DE REGISTRO DE CONTENIDOS DE HUMEDAD INICIAL ϕ_1 | 284 |
| ANEXO A. 22. F5 - HOJA DE REGISTRO DE CONTENIDOS DE HUMEDAD FINAL ϕ_2 | 285 |
| ANEXO A. 23. DOCUMENTACIÓN COSTOS SECADORA. | 287 |

ANEXO B. PSICROMETRÍA DEL PROCESO DE SECADO

ANEXO C. PLANOS

ANEXO D. MANUAL DE OPERACIÓN

ANEXO E. REPORTES DE PRUEBAS

| | |
|---|-----|
| ANEXO E. 1. REPORTE DEL CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL - PRUEBA 1 | 311 |
| ANEXO E. 2. REPORTE DEL CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL - PRUEBA 1..... | 312 |
| ANEXO E. 3. REPORTE DEL CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL - PRUEBA 2 | 313 |
| ANEXO E. 4. REPORTE DEL CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL - PRUEBA 2..... | 314 |
| ANEXO E. 5. REPORTE DEL CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL - PRUEBA 3 | 315 |
| ANEXO E. 6. REPORTE DEL CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL - PRUEBA 2..... | 316 |

ANEXO F. FOTOGRAFÍAS

NOMENCLATURA UTILIZADA

- **Brácteas.** Hojas que envuelven la mazorca de maíz.
 - **Elutriación.** Lavar o mezclar con agua una sustancia porfirizada(pulverizada sobre loza de pórfido) y separar por decantación las partes más ligeras o leves de las más pesadas
 - **EMC.** Límite del contenido de humedad del grano hasta el cual es posible secar el producto bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad relativa del aire de secado.
 - **Empardeamiento.** Decoloración causada por el sobrecalentamiento del grano.
 - **Encostramiento.** Fenómeno del proceso de secado donde los productos ricos en almidón ven interrumpido el secado de las capas internas debido al excesivo secado de las capas exteriores.
 - **EUCS.** Eficiencia de utilización de calor sensible, considera el calor sensible total en el aire de secado.
 - **Fluidización.** Fase del proceso de transferencia de calor en lecho fluido.
 - **Higroscópico.** Capacidad del grano de ganar o perder humedad hasta alcanzar el equilibrio con el aire circundante.
 - **Lecho fluido.** Referente al proceso de transferencia de calor entre un material particulado y un gas circulando.
 - **Organoléptica:** Referente al conjunto de características de un alimento apreciables por los sentidos humanos: forma, tamaño, color, sabor, olor
 - **Pienso.** Porción de alimento seco que se da al ganado
 - **Plenum.** Cámara de distribución del aire.
 - **Porosidad.** Indica el porcentaje de espacios vacíos que dejan los productos entre sí cuando están almacenados a granel o empacados.
 - **Psicrométrica.** Referente a las propiedades físicas del aire.
 - **Silo.** Nave industrial donde se almacena y procesa productos agrícolas.
 - **Viabilidad del grano.** Propiedad está directamente vinculada a la temperatura alcanzada por los granos durante el secado, capacidad de germinación.
-

INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cereales de más amplio consumo en todo el mundo y sus principales zonas de cultivo son Estados Unidos, América Central, Argentina, Brasil, Europa Sur-oriental, China, África del Sur e Indonesia. Tiene tres aplicaciones posibles: alimento, forraje y materia prima para la industria.

En la agricultura de subsistencia continúa siendo utilizado como cultivo alimentario básico, se puede consumir todo el grano, maduro o no; con técnicas de molienda en seco se puede obtener sémola de partículas, sémola en escamas, harina y harina fina, que tienen un gran número de aplicaciones en una amplia variedad de alimentos. Como forraje, en los países industrializados, más del 60 por ciento de la producción se emplea para elaborar piensos (porción de alimento seco que se da al ganado) compuestos para aves de corral, cerdos y rumiantes; en los últimos años, aun en los países en desarrollo en los que el maíz es un alimento fundamental, se utiliza un porcentaje más elevado de la producción como ingrediente para la fabricación de piensos.

Desde hace relativamente poco tiempo, el maíz con elevada humedad ha despertado gran interés como alimento para animales, debido a su menor costo y a su capacidad de mejorar la eficiencia de la transformación de los alimentos. El aumento de los precios del petróleo ha impulsado la intensificación de las investigaciones sobre la fermentación del maíz para producir alcohol combustible, el cual tiene un uso muy difundido en algunas partes de los Estados Unidos. Con maíz fermentado se elaboran también algunas bebidas alcohólicas. Los residuos de la planta de maíz se utilizan como base para extraer diversos productos químicos para mejorar los suelos.

El secado de los alimentos y cultivos como método de conservación es una de las técnicas de procesamiento más antiguas y efectivas que se conocen y practican. Probablemente su práctica viene de la época en que nuestros ancestros pasaron de cazadores recolectores a agricultores. En la actualidad, todavía es el método más utilizado por millones de agroprocesadores en todo el mundo. Su objetivo principal es garantizar la seguridad alimentaria. Existe una amplia variedad de productos cuyas

características naturales permiten que sean sometidos a esta técnica, tales como los cereales, que se procesan en grandes cantidades -generalmente para el autoconsumo- y que normalmente adquieren un valor agregado, lo que permite su comercialización.

Los productos que tradicionalmente han sido sometidos al secado son, en primer lugar, los cereales, las menestras y, en menor grado, las carnes, el pescado, y algunos vegetales, frutas y hierbas. Es importante señalar que todos los métodos de secado se han desarrollado debido a que resultaban convenientes o aceptables para determinadas condiciones ambientales.

Básicamente, el proceso de secado consiste en retirar, por evaporación, el agua de la superficie del producto y traspasarla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto, su grado de sequedad, entre otros), y de las características del producto (su composición, su contenido de humedad, el tamaño de las partículas, entre otros). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y, por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata más rápidamente.

En el Ecuador en muchos casos el proceso de secado del grano, previo a su utilización en la industria, todavía se realiza de manera artesanal en tendales. Para su almacenamiento y utilización en la industria (avícola principalmente) es necesario secar grandes cantidades de maíz húmedo de aproximadamente 20% hasta 13% de contenido de humedad.

Existen diversas clases de secadores, su clasificación obedece a criterios como el método de secado: tradicional o mejorado con tecnología, natural o artificial, por el flujo del producto, entre otros.

Este proyecto tiene como objetivo general diseñar e instalar un sistema de calentamiento de aire a base de gas junto con un sistema de ventilación forzada que permita disminuir el contenido de humedad aproximadamente del 20% al 13% en una

masa de grano de 400 qq de maíz amarillo en un tiempo estimado entre 8 y 12 horas de operación que se obtendrán en el diseño del sistema que se estudia.

Dentro de los objetivos específicos se han señalado el análisis de la teoría referente al proceso de secado de granos y la tecnología disponible en el medio, el diseño, selección e instalación de los sistemas de calentamiento de aire y de ventilación forzada y la realización de pruebas de evaluación del desempeño del sistema y de la calidad del producto.

Como hipótesis se ha planteado que el diseño de los sistemas de calentamiento y ventilación forzada y la subsiguiente selección de equipos utilizando como parámetros la capacidad máxima y las condiciones más adversas posibles ofrecerá al usuario confiabilidad del equipo y calidad del producto secado.

Para diseñar máquinas y procesos que involucren operaciones de secado y almacenamiento de maíz se deben considerar las características físicas, mecánicas y térmicas del producto además de las condiciones ambientales del sitio de operación.

Debido a factores que incluyen: las actuales prácticas de secado de la localidad (no existen), el volumen de material que debe ser secado (lotes de 400qq), las condiciones climáticas (muy variables), las características del material que va a secarse (maíz húmedo procedente del oriente), la disponibilidad de materia prima, la disponibilidad de combustibles (línea de alta tensión inexistentes) y los costos involucrados, diversidad de productos, comercialización y demanda de calidad (contenido de humedad de 13%), se escogió instalar un secador por tandas o conocido como secador de lecho estacionario con un sistema de calentamiento con combustible gas GLP y quemador tipo tobera, y sistema de ventilación forzada con ventilador centrífugo y motor EC.

La Cia. Guerra Ayala requiere implementar el proceso de secado en sus instalaciones de San Antonio de Pichincha, con la finalidad de maximizar sus utilidades al comprar grano húmedo, de menor precio, y vender grano seco, de mayor valor.

En los meses de enero, febrero, marzo que son la primera época de cosecha del año y en los meses de agosto, septiembre y octubre meses de la segunda cosecha del año, la Cia. Guerra Ayala comercializa alrededor de 160 toneladas (3200 qq) mensuales de producto.

Posteriormente el programa de pruebas para el presente proyecto se diseñó para cumplir con dos propósitos específicos: validar el modelo matemático que fundamentó la selección de los equipos del secador y evaluar la calidad del proceso de secado.

De acuerdo a todas las consideraciones expresadas anteriormente los autores determinaron el tipo de componente de cada subsistema, calcularon los requerimientos técnicos mínimos para, posteriormente, seleccionar cada uno de ellos en base a su disponibilidad en el mercado.

En el tercer capítulo se desarrolló el cálculo, diseño y selección de los sistemas y sus componentes. En primera instancia se comprobó la utilidad de la obra civil instalada al inicio del proyecto (cámara de secado) verificando sus dimensiones y capacidad máxima de carga. En segunda instancia se determinaron variables de operación como la cantidad de calor requerida por el sistema, tiempo de operación y caudal de aire para dimensionar y seleccionar los componentes del sistema de calentamiento, determinando a la vez las condiciones que rigen el sistema de ventilación forzada. También se desarrollaron los formatos de registro que sirvieron para la evaluación de los modelos matemáticos planteados: resistencia mecánica de los componentes de la cámara de secado, balances de calor, pérdidas de presión a través de la cámara de secado y lecho de maíz, entre otros.

En el cuarto capítulo se especificaron los procedimientos seguidos para la instalación de los equipos, además se presentan los resultados de las pruebas de evaluación del modelo matemático que sirvió como base para el capítulo de diseño y selección de equipos. Una vez realizadas las pruebas de evaluación se encontró que los resultados del modelo matemático planteado son aplicables a las condiciones del proceso de secado, constituyen un buen estimador de las condiciones reales y una herramienta útil para el diseño de sistemas similares y la posterior selección de equipos. Así mismo se presentan los resultados de las pruebas de control de calidad que se

presentan en diagramas de control de medias y diagramas de control de amplitudes, los cuales muestran que el proceso suministra un producto de calidad uniforme bajo los estándares apropiados.

En el capítulo quinto se desarrolla el estudio económico del proyecto, (VAN positivo = 11.646,73 USD y TIR = 73,31%) con el cual se demuestra que el proyecto es aceptable y rentable para la compañía cumpliéndose con el objetivo de TCGA de crear valor al implementar la operación de secado de maíz.

En el presente proyecto se presentó una amplia descripción de las diversas técnicas empleadas, muchas de las cuales (principalmente las técnicas de secado natural de bajo costo) pueden ser exitosamente aplicadas en nuestro país, dadas las bondades de nuestro entorno natural.

Finalmente queremos resaltar la importancia del estudio de las técnicas de secado de alimentos en el país y su aplicación para desarrollar la actividad agrícola. Por la importancia de este sector como pilar de la economía en el mundo globalizado que exige la competitividad en todos los ámbitos y principalmente, la inminente firma de tratados de comercio con países que subsidian vigorosamente a su sector agrícola es necesario e impostergable desarrollar soluciones de bajo costo que maximicen nuestro potencial. Esperamos que esta contribución pueda servir a la comunidad como incentivo para la investigación más profunda de un tema tan importante.

Los autores.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1. Antecedentes

La Cía. Guerra Ayala se dedica al transporte de carga extra-pesada a nivel nacional y a la comercialización de madera y maíz amarillo provenientes del Oriente ecuatoriano.

En lo que se refiere al maíz amarillo la empresa compra el grano en diferentes zonas del Oriente ecuatoriano como: Coca, Sacha, Shushufindi, Loreto, entre otros; a diversos intermediarios a un precio determinado cada quintal de grano húmedo o a su vez puede comprar en ocasiones grano procesado en secadoras de tipo artesanal o en tendales a un precio mayor. En los meses de enero, febrero, marzo que son la primera época de cosecha del año y en los meses de agosto, septiembre y octubre meses de la segunda cosecha del año, la compañía comercializa alrededor de 180 toneladas (4000 qq) mensuales de producto.

La empresa requiere implementar el proceso de secado en sus actividades con la finalidad de maximizar sus utilidades al comprar grano húmedo, de menor precio, y vender grano seco, de mayor valor. El producto comprado a los intermediarios no cumple con los requerimientos de las diferentes empresas dedicadas al procesamiento del grano ya que presenta excesivo contenido de humedad. Además, la implementación de este proceso le permitirá almacenar el producto durante intervalos de tiempo más largos y en mayores volúmenes.

La calidad del grano procesado en secadoras de tipo artesanal o en tendales, que es lo que en la actualidad comercializa la empresa, no garantiza un contenido de humedad fiable para las industrias que procesan el grano ya que el producto no presenta

el contenido de humedad exacto y uniforme requerido para los diferentes procesos a los cuales es sometido el grano luego de la venta. Esto quiere decir que existen empresas o personas naturales que requieren diferentes grados de humedad del producto según su necesidad.

La Cia. Guerra Ayala en su afán de satisfacer de una mejor manera a sus clientes hace un año aproximadamente inició la construcción de la obra civil de la secadora de granos la cual fue concluida satisfactoriamente.

1.2. Definición del problema

La compañía actualmente realiza el transporte del maíz seco desde los centros agrícolas hasta el consumidor y busca agregar valor a su cadena de servicio para lo cual desea implementar el proceso de secado del grano. El problema consiste entonces en diseñar una secadora de maíz que permita a la empresa abaratar sus costos del grano comprándolo recién cosechado para secarlo en sus instalaciones y comercializar grano seco a los consumidores, aumentando el margen de utilidad de la operación de compra – venta de maíz.

1.3. Señalamiento de objetivos

1.3.1. Objetivo general

Construir un sistema de calentamiento de aire a base de gas que permita disminuir el contenido de humedad en una masa de 600 [qq] de maíz amarillo en un tiempo de operación estimado de 12 horas para disminuir la humedad del producto de un 20% de contenido de humedad inicial hasta el 14% de contenido de humedad final.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar la teoría referente al proceso de secado de granos y la tecnología disponible en el medio.

- Comprender los procesos físicos y variables que intervienen en el secado de granos así como la incidencia de sus cambios sobre el proceso y la calidad del producto.
- Diseñar el sistema de calentamiento de aire a base de GLP, el sistema de ventilación forzada y seleccionar los equipos comercialmente disponibles bajo parámetros de diseño y consideraciones de conveniencia económica.
- Implementar la construcción y montaje del diseño realizado bajo las especificaciones técnicas, con el presupuesto disponible y en el plazo previsto.
- Realizar pruebas del sistema construido para evaluar su desempeño y calidad del producto secado y capacitar al personal encargado de la operación de la secadora.

1.4. Alcance

Mediante la implementación de este proyecto se persigue satisfacer la necesidad presente de la Cia. Guerra Ayala, la cual adquiere un producto, en este caso maíz amarillo, que ha sido sometido a un proceso de secado de tipo artesanal y exponerlo a un proceso de secado técnicamente controlado. A pesar de que se aplicarán principios de transferencia de calor en lecho fluidizado, es menester recalcar que este proyecto llegará solamente a la fase de fluidización denominada de lecho estacionario; llevar a cabo el diseño del secador que lleve el producto a fase densa o fluidizada, en la cual la transferencia de calor es más eficiente, incrementaría los requerimientos de capital del proyecto.

CAPÍTULO II

SECADORAS DE GRANOS

El secado de los alimentos y cultivos como método de conservación es una de las técnicas de procesamiento más antiguas y efectivas que se conocen y practican. Su objetivo principal es garantizar la seguridad alimentaria. En la actualidad todavía es el método más utilizado por millones de agro-procesadores en todo el mundo. Existe una amplia variedad de productos cuyas características naturales permiten que sean sometidos a esta técnica, tales como los cereales, que se procesan en grandes cantidades -generalmente para el autoconsumo- y que normalmente adquieren un valor agregado, lo que permite su comercialización.

Preservar los alimentos por medio del secado permite usarlos cada vez que se necesiten. Tal vez por ello, esta técnica es una de las más antiguas. Probablemente su práctica viene de la época en que nuestros ancestros pasaron de cazadores recolectores a agricultores, y desde ese momento se ha mantenido como uno de los métodos más usados para conservar los alimentos.

Los productos que tradicionalmente han sido sometidos al secado son, en primer lugar, los cereales, las menestras y, en menor grado, las carnes, el pescado, y algunos vegetales, frutas y hierbas. Es importante señalar que todos los métodos de secado se han ido desarrollando debido a que resultaban convenientes o aceptables para determinadas condiciones ambientales.

Un buen ejemplo lo constituye la carne seca -o biltong- de las zonas áridas y cálidas de África del Sur, o las piernas de res secadas al aire libre en las secas y frías montañas de Europa. En la zona andina de Sudamérica podemos citar como ejemplos la carne seca y salada de llama -el charqui-, y la papa seca, conocida como chuño, que se deja helar durante la noche y se pone al sol durante el día para que el agua helada se evapore. Cada producto, así como la técnica utilizada para secarlo, está muy relacionado con su medio ambiente. Las técnicas tradicionales de secado de alimentos suelen ser

muy dependientes del clima: el sol, la sombra, los niveles de humedad, las heladas, las corrientes de aire y, algunas veces, el calor del fuego.

En las zonas soleadas y de clima templado es frecuente ver productos alimenticios extendidos en los patios traseros, sobre esteras, piedras o colgando de los aleros de las viviendas. En los países más fríos también resultan apropiadas las técnicas tradicionales de secado cuando las condiciones climáticas son adecuadas, por ejemplo cuando hay bajos niveles de humedad. En Escandinavia y en las zonas montañosas de España se usan métodos tradicionales para el secado de carnes y pescado aprovechando el viento, el sol y la sombra.

Actualmente, la influencia de nuevos hábitos de consumo, el cultivo de productos no tradicionales y las técnicas de envasado que protegen el alimento seco de los efectos del clima están llegando a un número cada vez mayor de poblaciones en el mundo. A menudo esto implica que se incluyan en la técnica de secado alimentos que, de otro modo, no hubieran podido procesarse por no adecuarse a las condiciones locales. Hoy en día se están desarrollando nuevas técnicas de secado para enfrentar estos cambios.

2.1. Análisis del proceso de secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y traspasarla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto, su grado de sequedad, entre otros), y de las características del producto (su composición, su contenido de humedad, el tamaño de las partículas, entre otros).

El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad de vapor de agua presente en el aire se llama humedad. Un aire absolutamente seco, sin vapor de agua en su interior, contiene una humedad relativa de 0%, mientras que uno saturado de agua tiene una humedad relativa de 100%. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. Existen cuadros que permiten calcular la cantidad adicional de vapor de agua que el aire puede absorber a una temperatura y una humedad relativa determinadas. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y, por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata más rápidamente.

En la Tabla 2. 1 puede apreciarse cómo, a mayor temperatura, más capacidad del aire de absorber agua. Cuanto mayor sea el flujo de aire, más rápidamente se eliminará el agua del producto que se está secando.

Tabla 2. 1. Capacidad de absorción de agua del aire.

| Capacidad de absorción de agua del aire | | |
|--|-----------|---|
| Temperatura °C | HR | Gramos de agua que pueden ser retirados por kg. de aire seco |
| 29 | 90 | 0.6 |
| 30 | 50 | 7 |
| 40 | 28 | 14.5 |
| 50 | 15 | 24 |
| Referencia: Broker. Drying Cereal Grains. | | |

En la Tabla 2. 1 se muestra la cantidad de agua que, en teoría, puede absorber el aire. Sin embargo, en la práctica nunca se alcanzan estos niveles. Existen muchas razones para ello: la eficiencia con la que el aire se mezcla con el producto, la naturaleza del producto y otras. En condiciones normales, el aire puede retirar un 30 a 50% de esta cantidad teórica. Esta capacidad se conoce como "factor de arrastre" y se convierte en una guía para quienes diseñan equipos de secado.

Las características del producto, su naturaleza y el tamaño de las partículas también influyen en el nivel de secado. Muchos alimentos tienen una capa exterior de protección que impide que su interior se seque por completo. No hay mucho que se pueda hacer en el caso de los cereales y legumbres, que normalmente se secan enteros, pero el nivel de secado de otros productos puede facilitarse si el alimento se pela o corta.

Luego que la humedad de la superficie de un alimento se ha retirado por evaporación, el nivel de secado depende de la velocidad con la que su humedad interna se dirige a la superficie, lo que varía de un producto a otro. Por ejemplo, a diferencia de los materiales con almidón, los alimentos ricos en azúcares liberan más lentamente los niveles de humedad, por lo que necesitan más tiempo para su deshidratado. El tamaño también es un factor a tomar en cuenta: mientras más pequeña sea la pieza de alimento que se va a deshidratar, menor será la distancia que debe recorrer la humedad interna para llegar a la superficie. Por ello, técnicas como el cortado y el rebanado pueden ser útiles. Si el alimento va a cortarse, debe tenerse cuidado con el tipo de utensilios que se van a usar. Se recomiendan los cuchillos de acero inoxidable, pues los de hierro pueden decolorar el alimento.

Si se busca un producto de primera calidad, debe prestarse especial atención a los niveles de secado. La temperatura moderada y un alto grado de humedad dentro de la secadora favorecen el desarrollo de hongos, levaduras y bacterias. Si se toma en cuenta este aspecto, podría pensarse que cuanto más corto es el periodo de secado mejores son los resultados. Sin embargo, esto no se aplica para todos los alimentos: si se apresura el secado de productos ricos en almidones, por ejemplo, ocurre un fenómeno conocido como "encostramiento".

El encostramiento se produce cuando el agua que hay dentro del alimento no puede salir debido a la velocidad con que se ha secado la superficie. Así, el proceso de secado puede verse interrumpido si la superficie del alimento se seca por completo, creando una costra que evita que la humedad que estaba emergiendo continúe su curso.

En otros casos, aumentar la temperatura para intensificar el proceso de secado destruye las vitaminas, lo que origina la pérdida de color y sabor y la ruptura del grano, especialmente en el caso del arroz. La decoloración suele ocurrir tanto durante las fases preliminares como en las del secado propiamente dicho. Así, se produce el "empardeamiento" causado por reacciones químicas y bioquímicas o por sobrecalentamiento.

Tabla 2. 2. Algunas propiedades de alimentos

| Algunas propiedades de alimentos | | | | |
|--|------------------------|----------------------|--|-------------------------------|
| Producto | Humedad inicial | Humedad final | Temperatura máxima de secado (°C) | Tratamiento preliminar |
| Maíz | 35 | 15 | 60 | |
| Zanahorias | 70 | 5 | 65 | vapor |
| Albaricoques | 70 - 80 | 12 - 20 | 55 | bisulfito |
| Hierbas | 80 | 5 | 55 | |
| Coco deshidratado | 50 | 3 | 60 | bisulfito |
| Referencia: Enciclopedia Terranova 1995. | | | | |

Es más factible que el empardeamiento producido por reacción química se presente entre las azúcares y las proteínas. Esta coloración, además, es necesaria en la producción de ciertos alimentos de primera calidad. Como ejemplos se pueden citar la corteza del pan y el color oscuro en algunas frutas secas, como las pasas.

El empardeamiento bioquímico es causado por la secreción de enzimas de las células de la planta y su consecuente reacción con otros químicos naturales presentes en el alimento. Algunos ejemplos son el color oscuro que adquieren las rodajas frescas de papa o manzana después de haber sido cortadas. Esta coloración debe evitarse. Dos de los métodos más comunes usados para ello son el blanqueado en agua caliente o al vapor y el uso de dióxido de azufre.

Para obtener un producto seco de mejor calidad se debe alcanzar el equilibrio entre un nivel máximo de secado que permita obtener eficiencia económica y calidad micro biológica y un mínimo de pérdida de componentes esenciales en el alimento. Además, se debe tener en cuenta la forma como el alimento reabsorberá la humedad cuando se use.

Una vez que se han retirado de la secadora, los productos secos tienden a absorber humedad del ambiente. La cantidad de humedad que un alimento puede absorber depende del producto y del clima. En un clima húmedo, la sal atrae mucha humedad, lo que le impide fluir con facilidad; pero no ocurre lo mismo en el caso de la pimienta. La pimienta y la sal están en equilibrio con la atmósfera circundante, pero alcanzan distintos niveles de humedad. Cada producto deshidratado se comporta de distinta manera.

La presencia de microorganismos -en especial hongos y levaduras en un producto seco depende en gran medida de las cualidades particulares del alimento y del contenido de humedad presente en él. Los dátiles secos, por ejemplo, normalmente contienen un grado de humedad de 25%, mientras que, con ese nivel de humedad, el té se convertiría en terreno propicio para el desarrollo de hongos.

Tabla 2. 3.Cantidad de humedad en aire.

| Producto | Cantidad de humedad en aire con: | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------|
| | 40% de HR | 70% HR |
| Té | 5% | 10% |
| Café | 9% | 14% |
| Trigo | 9% | 14% |
| Dátiles | 10% | 23% |
| Referencia: Enciclopedia Terranova. | | |

En el proceso de secado, el calor es necesario para evaporar la humedad del grano y el flujo de aire es necesario para transportar la humedad evaporada. Hay dos mecanismos básicos involucrados en el proceso de secado: la migración de la humedad de un grano individual hacia su superficie, y la evaporación de la humedad desde la

superficie al aire circundante. La tasa de secado está determinada por: el contenido de humedad y la temperatura del grano; y la temperatura, humedad relativa y la velocidad del aire en contacto con el grano.

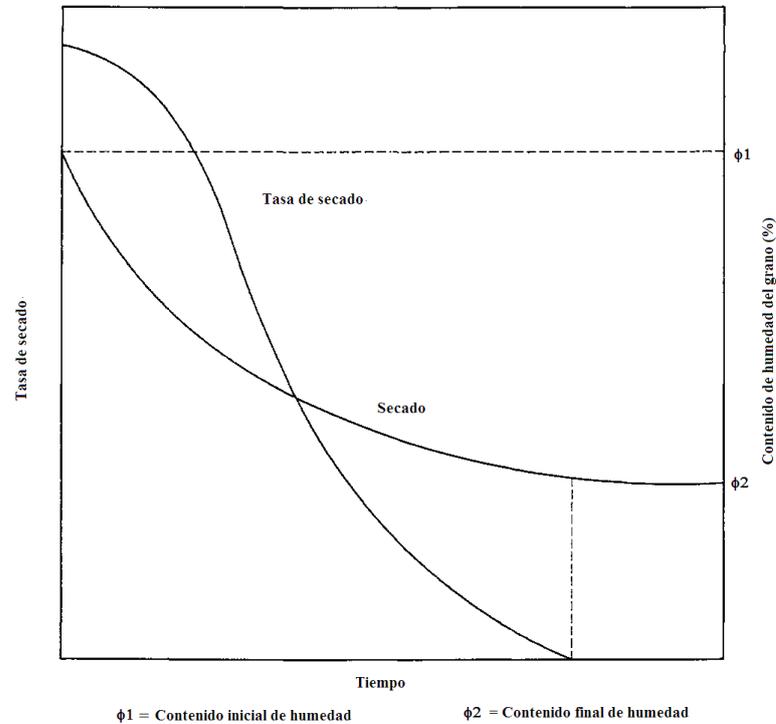


Figura 2. 1. Curvas de secado y tasa de secado.

La Figura 2. 1 demuestra el secado de una capa simple de grano expuesta a un flujo constante de aire. Primero, el contenido de humedad cae rápidamente, pero mientras el grano pierde humedad la tasa de secado disminuye. En general, la tasa de secado disminuye con el contenido de humedad, aumenta con el incremento de la temperatura del aire y disminuye con el incremento de la humedad del aire. A bajas velocidades de flujo de aire aumentar la velocidad provoca un secado más rápido, pero a mayores velocidades el efecto es mínimo; indicando que la difusión de la humedad dentro del grano es el mecanismo gobernante en el sistema.

Los granos son higroscópicos y perderán o ganarán humedad hasta alcanzar el equilibrio con el aire circundante. El contenido de humedad de equilibrio (EMC)

depende de la humedad relativa y de la temperatura del aire. En la Tabla 2. 4 se muestran contenidos de humedad de equilibrio para varios tipos de granos.

Tabla 2. 4. Contenido de humedad de equilibrio (EMC).

| Contenido de humedad de equilibrio (EMC) | | | | | | | | |
|---|---|-----------|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Grano | Humedad relativa (%) | | | | | | | |
| | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| | Contenido de humedad de equilibrio a 25 °C.(%wb) * | | | | | | | |
| Barley | 8.5 | 9.7 | 10.8 | 12.1 | 13.5 | 15.8 | 19.5 | 26.8 |
| Shelled Maize | 8.3 | 9.8 | 11.2 | 12.9 | 14.0 | 15.6 | 19.6 | 23.8 |
| Paddy | 7.9 | 9.4 | 10.8 | 12.2 | 13.4 | 14.8 | 16.7 | - |
| Milled Rice | 9.0 | 10.3 | 11.5 | 12.6 | 12.8 | 15.4 | 18.1 | 23.6 |
| Sorghum | 8.6 | 9.8 | 11.0 | 12.0 | 13.8 | 15.8 | 18.8 | 21.9 |
| Wheat | 8.6 | 9.7 | 10.9 | 11.9 | 13.6 | 15.7 | 19.7 | 25.6 |
| * Humedad relativa base húmeda. | | | | Fuente: Broker (1974). ¹ | | | | |

Es muy importante apreciar el significado práctico de contenido de humedad de equilibrio. Bajo ninguna circunstancia es posible secar a un contenido de humedad menor que el EMC asociado con la temperatura y humedad del aire de secado. Por ejemplo, los datos de la Tabla 2. 4 muestran que el maíz puede secarse hasta un contenido de humedad del 15,6% cuando es expuesto al aire a 25°C y 80% de humedad relativa. Si se requiere maíz con un contenido de humedad menor a 15,6% entonces se tiene que aumentar la temperatura del aire de secado o disminuir su humedad relativa.

En el secado de granos en un lecho profundo, a pesar de que todos los granos individuales pueden estar perdiendo humedad a tasas diferentes, la tasa de secado general permanecerá constante durante un largo período.

¹ La relación entre el contenido de humedad de equilibrio, la humedad relativa y la temperatura para muchos granos ha sido modelada por numerosos investigadores, cuyos resultados han sido resumidos por Brooker et al. (1974).

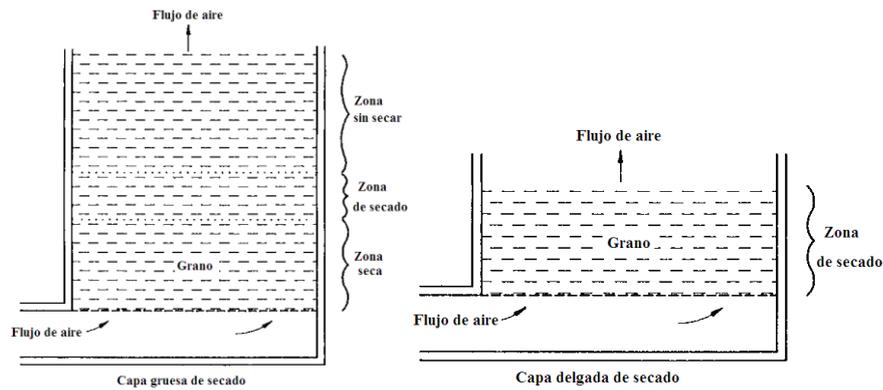


Figura 2. 2. Zonas de secado en el lecho.

El aire absorbe humedad mientras se mueve a través del lecho hasta que se satura por completo y se mueve a través de las capas de grano restantes sin ejercer efecto de secado. La Figura 2. 2 muestra las tres zonas presentes dentro de un lecho grueso en un tiempo intermedio dentro de la operación de secado. El secado toma lugar dentro de una zona discreta cuyo tamaño depende del contenido de humedad del grano y la temperatura, humedad y velocidad del aire. Bajo la zona de secado está la zona seca donde el grano está en equilibrio con el aire. Sobre la zona de secado está la zona sin secar, donde el grano permanece sin cambios desde sus condiciones iniciales. En un lecho angosto la zona de secado es mayor que la profundidad del lecho y el secado ocurrirá inicialmente a través de todo el lecho.

Los cambios en la temperatura y humedad del aire, mientras se mueve a través de un lecho de granos, dependen de la tasa a la cual la humedad está siendo evaporada de cada grano como elemento expuesto individualmente. El conocimiento del efecto del contenido de humedad del grano y además de otras propiedades del grano como, la temperatura, humedad y tasa de flujo de aire son esenciales para entender el mecanismo de secado al interior del lecho.

Desafortunadamente no ha sido desarrollada una teoría que describa de manera precisa y práctica la tasa de secado de una capa delgada. Como se describió antes, muchas relaciones empíricas han sido establecidas y tienen que usarse para la estimación del tiempo de secado. La predicción precisa del tiempo de secado es inhibida por la variabilidad de factores clave encontrados en la práctica, particularmente

para los sistemas de secado simple que son los más apropiados en países en vía de desarrollo. Por ejemplo el contenido de humedad de granos individuales parecen variar considerablemente dentro de un lote de granos. Y en el caso de secadores con una salida constante de calor, la temperatura del aire de secado variará con los cambios de la temperatura del aire ambiente.

2.2. Clasificación de los secadores por el método de secado

Los secadores de granos se pueden clasificar acuerdo con diversos criterios, tales como el tipo de proceso de secado, el flujo del producto en el secador y la temperatura de secado. La elección de uno de estos criterios depende del enfoque que se quiera dar al asunto.

Secadores tradicionales:

- Secado al sol
- Secado a la sombra.
- Hornos ahumadores
- Fogón.

Secadores artificiales:

- Secadores solares
- De flujos cruzados.
- De flujos concurrentes.
- De flujos contrarios

Secadores intermitentes.

2.2.1. Secadores naturales (Métodos tradicionales)

Estos simples métodos de secado tienen algunas ventajas:

- Prácticamente no requieren de ningún costo adicional, ya que no utilizan combustible.
- No necesitan estructuras permanentes, lo que permite que después de la estación de secado, el terreno quede disponible para la agricultura o para otros fines.

Pero también tienen muchas limitaciones:

- La pérdida de humedad puede no ser constante, ya que depende del clima.
- El secado es muy lento y a menudo el producto no llega a secarse completamente en un solo día, por lo que debe permanecer expuesto durante toda la noche para finalizar su secado al día siguiente. Esto aumenta el riesgo de deterioro, en especial debido al desarrollo de hongos.
- Los niveles finales de humedad que se alcanzan no son lo suficientemente bajos, lo que aumenta las posibilidades de deterioro del producto durante el almacenado. En otras ocasiones, el producto alcanza niveles de secado superiores a los límites recomendables.
- El producto está expuesto a la contaminación por el polvo y la suciedad y a la infestación por insectos.
- Al permanecer a la intemperie puede ser dañado o hurtado por las aves u otros animales.
- En el caso de cultivos a granel, como los cereales, se necesita mucho terreno para colocar el grano.
- Se requiere de mano de obra adicional para extender el grano, voltearlo y recogerlo cuando hay riesgo de lluvia.
- Los granos pueden adquirir un color oscuro y el nivel de ciertos nutrientes, particularmente las vitaminas, puede disminuir por la exposición directa al sol (este riesgo es mayor en algunos productos que en otros).

2.2.1.1. Secado al sol

El simple secado al sol es el método más usado en el mundo. En algunos países, los cultivos se secan extendiéndolos sobre los caminos, en las playas o en los techos de las casas, aprovechando el calor absorbido por estas superficies. Muchas veces se usan las rocas planas con el mismo propósito. Con frecuencia el material se coloca sobre esteras, lo que contribuye a reducir la contaminación causada por el polvo y facilita la manipulación.

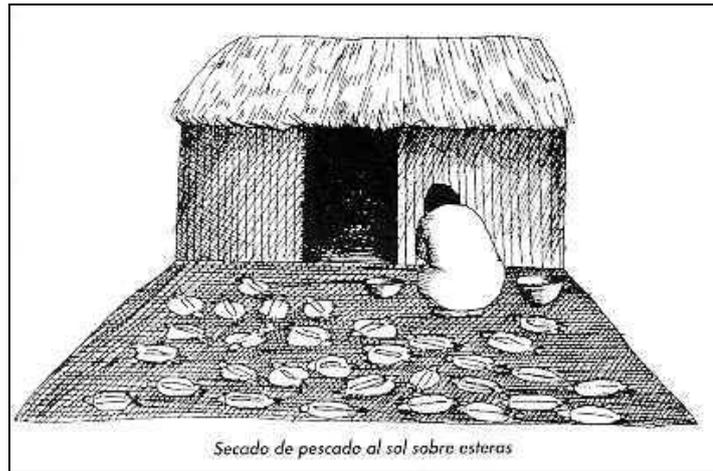


Figura 2. 3. Secado de alimentos al sol sobre esteras.

El simple secado al sol se aplica a una amplia gama de productos tales como el pescado, la carne, los cereales, las menestras, las frutas, los vegetales y las raíces comestibles.

Se pueden distinguir dos clases de secadoras solares: las secadoras solares directas y las secadoras solares indirectas. El uso de secadoras solares tiene más ventajas que el secado al sol:

- Las temperaturas son más elevadas y, en consecuencia, los grados de humedad son menores. Esto trae como resultado un secado más rápido y una humedad final menor.
- Las temperaturas elevadas que se generan actúan como una barrera contra la presencia de insectos y el desarrollo de moho.
- El producto dentro de la secadora está protegido del polvo y los insectos.
- El ritmo de secado es más acelerado, y debido a su sistema de rejillas requiere de menor cantidad de terreno para extender el cultivo.
- Permite un grado considerable de protección contra la lluvia, lo que hace innecesaria mano de obra adicional para recoger el material.
- Resulta comparativamente más barato de construir y no necesita mano de obra especializada.

2.2.1.2. Secado a la sombra

En algunos países, particularmente en aquellos de clima seco y con períodos de fuertes vientos, algunas de las limitaciones mencionadas pueden superarse por medio del secado a la sombra, utilizando los aleros de las viviendas, los balcones o cobertizos construidos especialmente. Así no hay tantas posibilidades de que el producto se oscurezca, se decolore o pierda vitaminas, y está protegido de la lluvia. Sin embargo, el secado a la sombra es un proceso lento, por lo que el producto está más expuesto al desarrollo de hongos.

Ejemplos comunes de secado a la sombra incluyen vegetales de hoja, algunas hierbas y especias y el secado final del maíz.

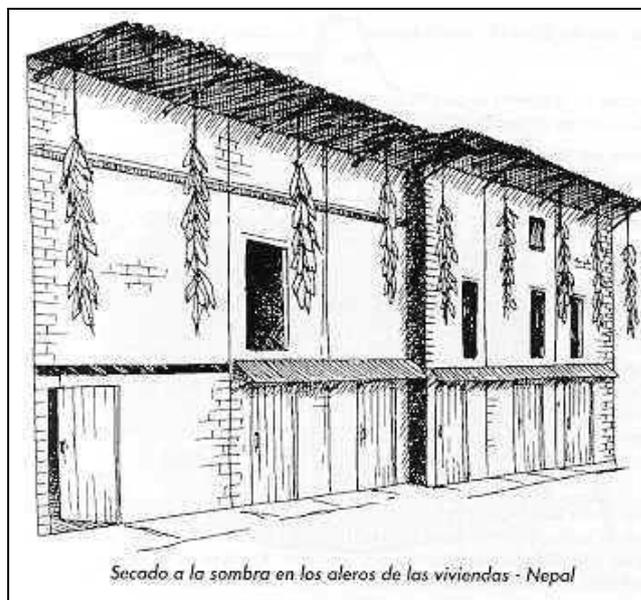


Figura 2. 4. Secado de alimentos a la sombra

2.2.1.3. Hornos ahumadores

En ciertos países, el secado se realiza en hornos ahumadores. Ésta es una práctica común para la producción de copra de coco y pescado seco y ahumado. En el caso del coco se usa una parrilla abierta que tiene listones de madera a un centímetro de distancia. Esta parrilla se coloca sobre un fuego suave. La combinación de calor y humo seca y preserva el alimento.

Hoy en día hay una tendencia creciente a dejar de lado la técnica del ahumado, en parte porque las cenizas que se mezclan con el alimento pueden ser nocivas para la salud. En el caso del coco, este efecto pasa a través del proceso tanto al aceite como a la torta residual.

2.2.1.4. Fogón

El calor del fogón también se usa para secar alimentos tales como el maíz, el ají y las hierbas, y para mantener en buenas condiciones los alimentos que han sido previamente secados. A menudo se levanta una tienda encima del fogón, ya sea en el techo de la vivienda o en un ático especialmente diseñado. El efecto combinado de calor y humo mantiene seco el producto y actúa como repelente contra los insectos, reduciendo las pérdidas por infestación.

Si bien estos sistemas de secado pueden parecer muy simples e ineficientes, a pesar de sus limitaciones desde hace miles de años han resultado efectivos para conservar los recursos y enfrentar la demanda de la población en muchas áreas rurales del mundo.

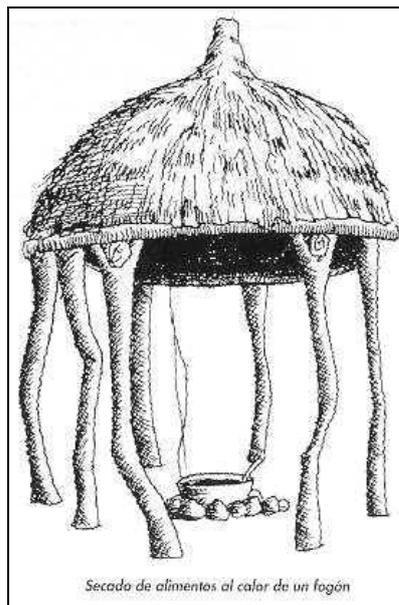


Figura 2. 5. Secado de alimentos al calor de un fogón.

2.2.2. Secadores artificiales (Tecnologías mejoradas)

Las mejoras en las tecnologías tradicionales descritas anteriormente pueden subdividirse en dos grandes grupos:

- Aquellas que dependen de la energía solar (secadoras solares).
- Aquellas que deben usar combustibles, ya sean con ventiladores o sin ellos, para aumentar la circulación de aire (secadoras artificiales o mecánicas).

La diferencia no siempre es muy clara. Se puede encontrar secadoras solares a las que se ha adaptado un ventilador eléctrico, o secadoras mecánicas a combustible que pueden usar energía solar para reducir sus costos.

Algunas técnicas de secado solar pueden necesitar alguna estructura adicional para concentrar y aprovechar al máximo el calor del sol. Una secadora solar o una mixta que combine energía solar con el uso de combustibles puede resultar una opción favorable para los agricultores, particularmente si se trata de reemplazar secadoras artificiales o complementar el uso de combustible con energía solar.

2.2.2.1. Secadoras solares directas

En este tipo de secadoras, el aire se calienta en una cámara de secado que cumple las funciones de colector solar y secadora.

La radiación solar pasa a través del techo transparente de la secadora (por lo general provista de una película de plástico o, en ocasiones, de vidrio) y calienta la cámara de secado, de preferencia pintada de negro para que absorba el máximo de calor. El aire caliente se eleva y emerge de la cámara a través de los orificios de salida colocados en la parte superior de la pared trasera. Éste es reemplazado por aire frío que ingresa a través de los orificios de entrada dispuestos en la base de la cámara. Se establece un flujo de aire que, combinado con la reducida humedad relativa del aire calentado, retira la humedad del producto.

Para alcanzar un máximo de eficiencia y reducir la pérdida de calor, el techo de la secadora debe tener dos capas de vidrio o plástico. A través de las paredes de madera de la secadora es muy poco el calor que se pierde, pero muchos trabajadores piensan que puede ser ventajoso construir la cámara con paredes de madera aislante.

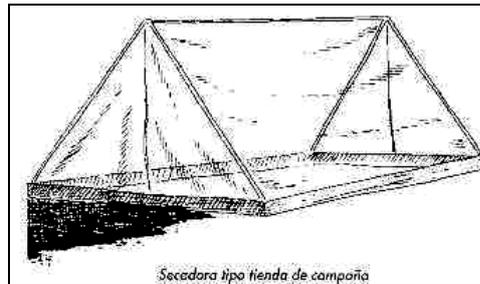


Figura 2. 6. Secadora tipo tienda de campaña.



Figura 2. 7. Secadora solar de bandeja corrediza.



Figura 2. 8. Secadora bajo un techo protector.

La creciente presión ejercida por las poblaciones en expansión, los altos costos del combustible, la deforestación y los cambios climáticos están llevando a tomar medidas urgentes para asegurar la provisión de alimentos. Las secadoras solares tienen un gran potencial para apoyar al productor rural en muchas zonas del mundo a enfrentar estos cambios.

Puede apreciarse que, si bien las secadoras solares pueden parecer una tecnología muy simple, en realidad no lo son. Se deben tener en cuenta todas las consideraciones expuestas, como la latitud, el periodo de cosecha, el clima local, la naturaleza del cultivo, entre otros.

2.2.2.1.1. Secadora de gabinete (tipo Brace o Lawand)

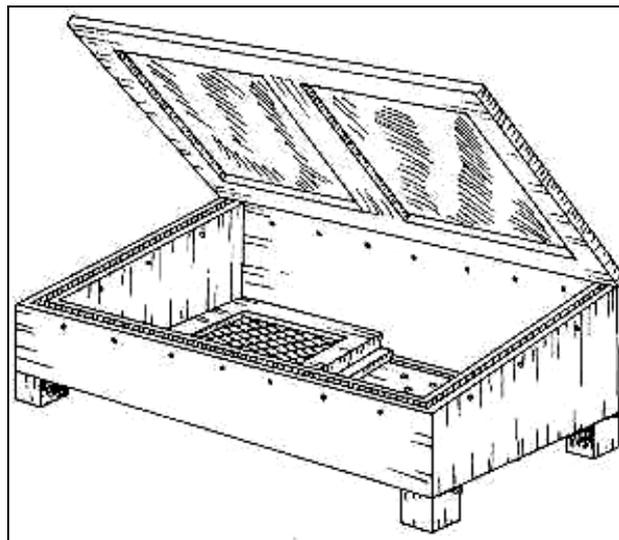


Figura 2. 9. Secadora tipo gabinete.

Entre los modelos más conocidos se encuentra el del tipo Brace o Lawand. El diseño básico consiste en un cajón rectangular de 1,8 a 2,4 m por 90 cm a 1,2 m, con techo de vidrio. El producto se coloca en bandejas de malla. El interior de la secadora debe pintarse de negro, con una pintura que no sea tóxica. Para mejorar el grado de eficiencia, las paredes y el piso deben ser de material aislante y el techo de la secadora debe tener doble capa de vidrio. En algunos diseños, el aire ingresa a través de unas

perforaciones en la base de la secadora y sale por unos orificios dispuestos en la parte superior de las paredes. En otros, como el que se muestra en la Figura, el aire ingresa a través de los orificios dispuestos en la pared frontal de la secadora y sale por las perforaciones que se encuentran en la pared posterior. Cubrir los orificios con una malla muy fina contribuye a controlar el ataque de insectos.

- Construcción: Por el usuario debidamente capacitado.
- Materiales: Con excepción de los vidrios, todos se hallan disponibles localmente (madera, esteras, barro o paredes de ladrillo). Algunos usuarios usan cáscara de arroz como material aislante. Las bandejas pueden fabricarse de estera, malla de hierro galvanizado o malla de plástico; el techo, de polietileno o de lámina resistente a la acción de los rayos ultravioletas. La arcilla o la harina de trigo, mezclada con carbón, pueden reemplazar a la pintura negra.
- Mantenimiento: A cargo del usuario.
- Operación: Simple.
- Costo: Bajo.
- Aplicación: Para una amplia gama de productos, tales como ajíes, albaricoques, coco, frutas y verduras, camotes, pescado. En Kenya se encontró que una unidad de 4 m por 2 m podía usarse exitosamente para el secado de cereales.
- Ventajas: Costo comparativamente bajo. Puede operar cerca de la casa del usuario, y para su construcción puede usarse una amplia gama de materiales disponibles localmente. El secado se realiza en menor tiempo y en condiciones más higiénicas que las que se obtienen con el secado al sol.
- Desventajas: Cuando se seca pescado, este tipo de secadora atrae más moscas que los otros modelos descritos, como el tipo tienda de campaña o aquel provisto de una chimenea. Son un poco más caras que las secadoras tipo tienda de campaña. Su capacidad es reducida. Tendrán una vida muy corta si se emplea polietileno en lugar de láminas de plástico especial. Necesitan poco o ningún control sobre el grado de temperatura.
- Variaciones: Se ha experimentado una serie de modificaciones en el diseño:
 - se obtiene una mejor distribución de aire si se añaden tuberías en su interior.
 - se logra almacenar el calor si se coloca una capa de piedras de color oscuro en la base del gabinete. Ello mejora los niveles de secado en los días nublados o durante el periodo de lluvias.

- se reduce la pérdida de color y de vitaminas si al secar las verduras se coloca sobre ellas una plancha de metal pintada de negro o un plástico de color negro para hacerles sombra.
- se incrementa el nivel de flujo de aire si se coloca una chimenea pintada de negro en el punto de salida del aire de la secadora.
- se reduce la entrada de insectos si se cubren los orificios de entrada o de salida de aire con una malla muy fina.
- se prolonga la vida del equipo si se usan pequeñas puertas en la pared posterior para cargar y descargar el producto, evitando así manipular continuamente el techo de la secadora.

2.2.2.1.2. Secadora provista de un amplio pasaje central

En la Figura se muestra un diseño similar al anterior, pero que cuenta con un amplio pasaje central, y que ha sido utilizado para el secado solar de café en Colombia.

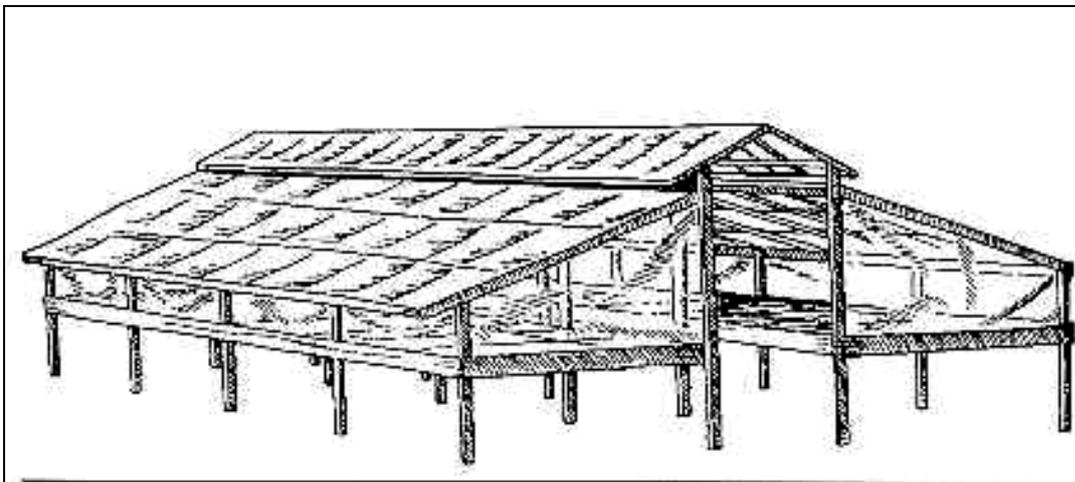


Figura 2. 10. Secadora con pasaje central.

2.2.2.1.3. Secadora tipo tienda de campaña

Es un diseño muy popular y de bajo costo. Consiste en una armazón tipo tienda de campaña con cubierta de plástico transparente en el lado que da al sol y de color negro en el lado que da a la sombra. En algunas ocasiones, la tienda se fabrica

totalmente de plástico transparente con piso de color negro. El producto se coloca en una rejilla ubicada a unos 45 cm por encima del suelo. La vía de acceso es a través de una de las paredes plegadizas. El flujo de aire y la temperatura pueden controlarse elevando o bajando las paredes plegables laterales de la tienda, que se desarrollan sobre una varilla.

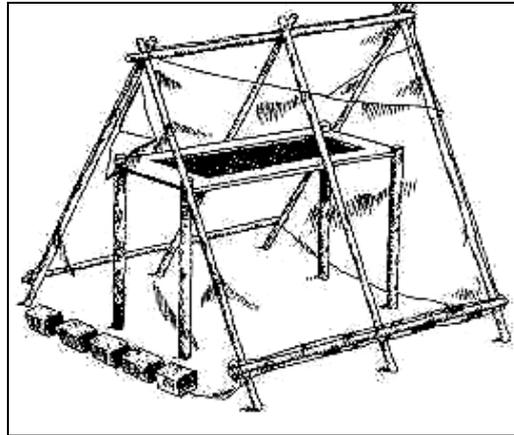


Figura 2. 11. Secadora tipo tienda de campaña.

- Construcción: Simple, a cargo del usuario debidamente capacitado.
- Materiales: Disponibles en la localidad (madera, varillas, cañas de bambú, láminas de plástico). El polietileno puede ser fácil de encontrar, pero las láminas resistentes a la acción de los rayos ultra violetas probablemente deban ser importadas.
- Mantenimiento: A cargo del usuario.
- Operación: Simple.
- Costo: Bajo.
- Aplicación: Se han usado tiendas de secado para diversos productos, talas como frutas, especias y cereales. Existe interés en usarlas para el secado de pescado. Han sido utilizadas en Bangladesh, Papua Nueva Guinea, Filipinas e Islas Galápagos.
- Ventajas: Proporcionan protección contra la infestación de insectos, lo que permite obtener un producto de mejor calidad. Resultan baratas y fáciles de construir y operar. En Bangladesh, el secado de pescado por medio de esta técnica toma por lo menos un 25% menos de tiempo que el secado al sol. El

equipo se puede desarmar fácilmente para almacenarlo entre estaciones de secado.

- Desventajas: Se daña con facilidad por acción del viento o debido a que los niños la utilizan como casa de juegos.
- Variaciones: Otras secadoras de este tipo, como la semicircular, son menos propensas al daño producido por el viento. En el Perú, una secadora tipo tienda de campaña de aproximadamente 4 m por 1,5 m por 1 m, que tiene la forma de un cajón rectangular y que contiene varias bandejas de secado, se usa para el secado de papas precocidas. Para el secado de pescado se usan grandes secadoras tipo tienda cuyo diseño se parece a los invernaderos para horticultura.

2.2.2.2. Secadoras solares indirectas

Si el producto se ve afectado por la exposición directa al sol, que puede causar una coloración oscura y la pérdida de algunos componentes tales como las vitaminas, se puede hacer sombra al interior de la secadora colocando sobre el producto una plancha de acero galvanizado pintada de negro.

Una secadora solar indirecta incluye dos partes: un colector solar que recibe la radiación del sol, y una cámara de secado que contiene el producto a secar, conectada al colector.

El aire ingresa al colector, donde se calienta. De este modo, se reduce el nivel de humedad y el aire caliente se eleva a la cámara de secado por convección natural. Estas secadoras deben adaptarse a las condiciones climáticas locales, al tipo de producto y a la disponibilidad de materiales de construcción.

Muchos proyectos cuyo objetivo era introducir estos equipos fracasaron por no tener la información debida acerca del clima local. Durante la estación de secado, resulta muy importante obtener información diaria y estacional acerca de las variaciones

que se producen con respecto a la cantidad de sol, el nivel de humedad, la temperatura, la velocidad y la dirección del viento.²

En zonas muy húmedas puede ser necesario aumentar el flujo de aire para obtener mejores niveles de secado. Esto puede lograrse colocando una chimenea de color negro en el punto de salida de aire de la secadora. Una chimenea pintada así produce una mayor corriente de aire y, en consecuencia, un mayor nivel de flujo de aire.

Algunas secadoras, particularmente las indirectas, incorporan grandes cantidades de piedras de color oscuro en el colector. Después de haber recibido el calor del sol durante todo el día, éstas seguirán irradiándolo durante la noche. De este modo, el producto continuará con el proceso de secado.

El ángulo de inclinación que se dé al techo de la secadora o del colector es básico para elevar al máximo la concentración de energía solar. El ángulo de los rayos solares varía durante el verano y el invierno, de manera que al construir las secadoras se debe tomar en cuenta la época del año en que el producto será cosechado.

En áreas lluviosas es importante que el ángulo del techo tenga una inclinación de 15° como mínimo para permitir que el agua corra y la inclinación del techo debe dar la cara al sol. La recomendación de que el equipo se coloque en un lugar alejado de la sombra de los árboles o en zonas donde no se produzcan fuertes vientos parece obvia, pero a menudo son aspectos que no se toman en cuenta. Generalmente puede usarse un protector contra el viento para prevenir que el producto se enfríe demasiado o se deteriore. Existen láminas especiales de plástico para su uso en secadoras solares, pero normalmente éstas no se hallan disponibles en la aldea. Sin embargo, pueden utilizarse a cambio láminas de polietileno. Este material tiene una vida más corta, pues la continua exposición al sol hace que se torne quebradizo y de color amarillento.

Se recomienda que el colector sea construido en varias secciones pequeñas. Cualquier daño que pueda ocurrir afectará sólo a una pequeña pieza que deberá reemplazarse, pero se reduce la posibilidad de que el techo se hunda.

² Para el presente proyecto se consultó la información del INAHMI

La lluvia puede causar un terrible impacto en las secadoras solares. El efecto inmediato es el enfriamiento repentino de la cubierta, a menudo acompañado de bruma debido a la condensación, lo que hace que la convección del flujo de aire se interrumpa. Una vez que vuelva a salir el sol pasará algún tiempo antes de que la secadora esté operativa de nuevo. Una opción relativamente barata y fácil de transportar es una cubierta de paja que puede colocarse sobre la secadora al menor signo de lluvia. Esto reduce el impacto de la caída del agua.

2.2.2.2.1. Secadora indirecta tipo chimenea con capacidad para una tonelada

Este diseño consta de un colector solar cuyo interior es negro para que absorba el calor y una cámara de secado a la que se ha adaptado una chimenea. En la cámara de secado el producto se coloca en bandejas. Ambos -el colector con armazón de madera y la cámara de secado- se cubren con una lámina de plástico transparente. La gran chimenea se cubre con plástico negro. La superficie negra absorbe más calor, calentando el aire en la chimenea y elevándolo. Ello produce una corriente de aire e incrementa el flujo de aire al interior de la secadora.

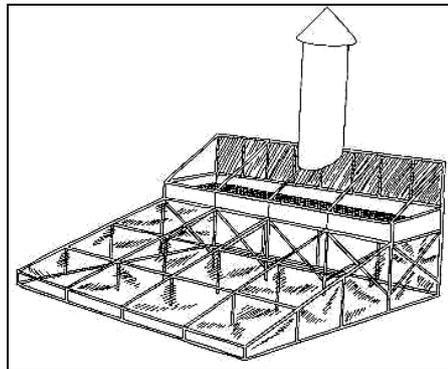


Figura 2. 12. Secadora tipo chimenea.

- Construcción: A cargo del usuario debidamente capacitado, aun cuando su construcción resulta más compleja que los diseños presentados anteriormente.
- Materiales: Disponibles en la localidad (madera, varillas, cañas de bambú, entre otros). El colector, cuyo interior es negro, puede fabricarse con cáscaras de arroz quemadas o láminas de plástico negras. Se requiere de una lámina de plástico

transparente para cubrir el equipo y una lámina negra de plástico para la chimenea.

- Mantenimiento: A cargo del usuario.
- Operación: Simple.
- Costo: Medio.
- Aplicación: Este modelo se ha utilizado en Tailandia para el secado de arroz, pescado, frutas y
- Ventajas: Puede procesar un gran volumen de materia prima. En Tailandia se han construido equipos con capacidad para una tonelada que pueden secar el producto en menos tiempo que el registrado para el secado al sol en condiciones climáticas favorables. Pueden construirse en distintas dimensiones. El modelo típico de Tailandia tiene una capacidad de una tonelada y está provisto de un colector de 7 m por 4,5m.
- Desventajas: Consta de una estructura semi-permanente que ocupa terreno. Está expuesto al daño producido por el viento y las tormentas.
- Variaciones: El piso del colector solar puede cubrirse con material oscuro, tal como arena, piedras o cáscaras de arroz quemadas para mejorar la eficiencia de concentración de calor.

2.2.2.2.2. Secadora tipo colector solar (secadora indirecta "Nuevo México")

Este diseño de secadora es similar al de la secadora tipo chimenea, ya que cuenta con un colector solar independiente conectado a una cámara de secado provista de bandejas. La secadora que se muestra en la Figura se basa en un diseño de la Asociación de Energía Solar de Nuevo México.

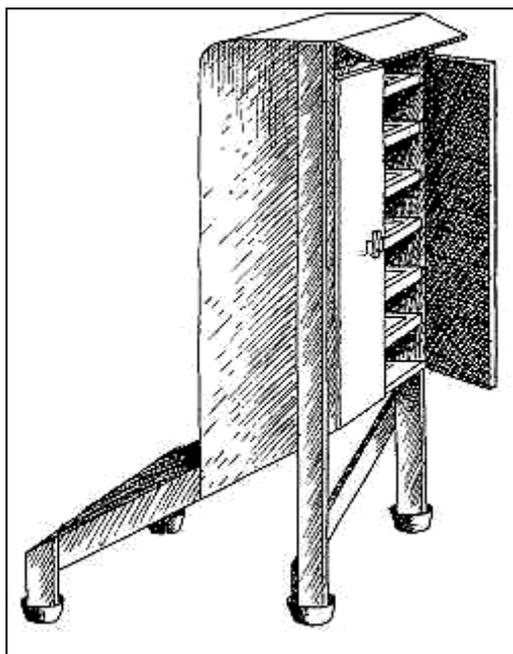


Figura 2. 13. Secadora tipo colector solar.

En este modelo, el colector solar independiente cubierto por fibra de vidrio y contiene una lámina de metal pintada de negro para que absorba el calor. La cámara de secado de madera contiene una buena cantidad de bandejas. El aire calentado en el colector circula a través de las bandejas llenas con el producto y sale por la parte superior del gabinete. Los pies de la secadora descansan sobre pequeñas latas llenas de kerosene, para prevenir el ataque de los insectos.

- Construcción: Relativamente simple. Se requiere de un ambiente especial para los trabajos de carpintería.
- Materiales: Disponibles en la localidad (madera, triplay y malla para las bandejas). El colector de fibra de vidrio puede reemplazarse con una lámina de polietileno de doble cara.
- Mantenimiento: A cargo del usuario, pero se requiere de cierto grado de capacitación
- Operación: Relativamente simple.
- Costo: Medio,
- Aplicación: Frutas y verduras, particularmente aquellas más susceptibles de verse afectadas por la exposición directa a los rayos solares. El éxito de la secadora se

basa en que se usa para productos que van a ser comercializados. Esta secadora ha sido usada para los plátanos en Brasil, uvas en Chile, pescado en Malasia, cebolla en Indonesia, taro en los Estados Unidos y frutas y pescado en Filipinas (Cheema & Roberto, 1978; Gutiérrez et al., 1979; Martosubirjo et al., 1979; Pablo, 1980; Poy et al., 1980).

- Ventajas: Ideal para secar productos sensibles a la exposición a los rayos solares, pues ofrece el mayor grado de control de temperatura posible. Se pueden secar diversos productos al mismo tiempo.
- Desventajas: De costo comparativamente alto para la cantidad de producto a procesar, resulta más apropiada para productos de alto valor.
- Variaciones: Diversas secadoras de este tipo han sido diseñadas y evaluadas. En Bangladesh, se han construido modelos de bajo costo para uso doméstico a partir de esteras cubiertas con arcilla, y con colector de polietileno.
- Detalles: Disponibles a través de la Asociación de Energía Solar de Nuevo México, la Comunidad Central Menonita de Bangladesh e ITDG, Reino Unido.

2.2.2.2.3. Secadora solar de biomasa McDowell con auxilio de combustible

El diseño original fue propuesto por McDowell para superar los problemas de secado en zonas húmedas tropicales. La bandeja de secado con el producto se ubica debajo de un techo solar convencional provisto de doble hoja de material transparente. El aire ingresa a la cámara a través de los orificios situados debajo de la bandeja. Esta secadora tiene una caja de fuego conectada a tuberías de retención de calor que pasan por debajo de la bandeja hacia una chimenea externa.

Cuando el clima es nubloso y/o durante la noche, puede encenderse el fuego y el calor irradiará de la tubería, lo que permite que el producto siga secándose. Las tuberías que pasan a través de la secadora deben ser a prueba de humo y estar conectadas al tiro de la chimenea, que se mantendrá cerrada cuando el producto esté secándose al sol para evitar que el aire enfríe la cámara. La caja de fuego debe dar la para el viento para incrementar la corriente de aire y asegurar que las chispas que salen de la chimenea se mantengan alejadas de la cubierta de polietileno.

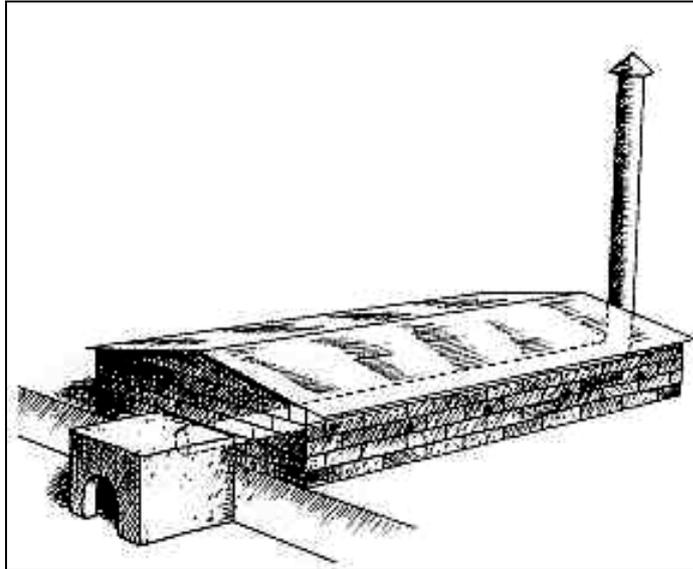


Figura 2. 14. Secadora solar de biomasa.

- Construcción: A cargo del usuario debidamente capacitado con apoyo de un taller de metal mecánica.
- Materiales: Ladrillos, barro o madera para las paredes, plástico para el techo, fogón de material resistente al fuego.
- Mantenimiento: A cargo del usuario.
- Operación: Simple, previa capacitación.
- Costo: Medio.
- Aplicación: Frutas, verduras y especias.
- Ventajas: Si bien es más cara que una secadora solar de similares dimensiones, tiene una gran ventaja: permite que el producto se seque en una sola etapa. Supera los problemas del mal tiempo. Su uso es apropiado para climas húmedos.
- Desventajas: Es más cara y depende en cierta medida de la leña, con posibles efectos sobre el medio ambiente.
- Variaciones: En Sri Lanka ha sido probada una modificación al diseño original que tiene una superficie de calor mayor, al incorporar cuatro a seis tuberías intercambiadoras de calor interno conectadas por un múltiple a la caja de fuego. Los costos de construcción pueden reducirse con el uso de barro y esteras de junco.
- Detalles: Algunos detalles de construcción se encuentran disponibles a través del VITA. Los modelos que utilizan barro y esteras se hallan descritos en

Appropriate Village Technology for Basic Services, UNICEF, 1977, o a través de ITDG en el Reino Unido.

2.2.2.2.4. Secadora solar de aire forzado para cereales

Esta secadora ha sido incluida como un ejemplo de colector solar al que se le ha incorporado un ventilador para producción de aire forzado. El aire calentado en el colector se traslada con ayuda del ventilador al recipiente de secado.

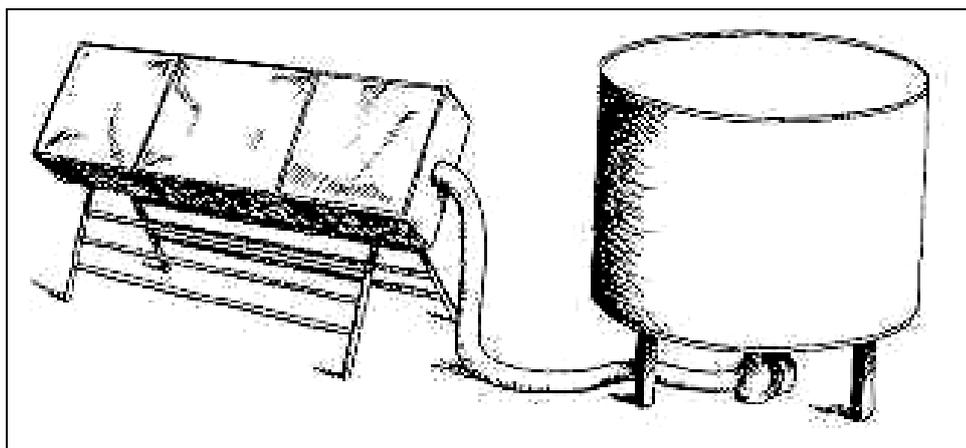


Figura 2. 15. Secadora solar de aire forzado.

- Construcción: Se requiere de capacitación en un taller de ingeniería.
- Materiales: Es muy probable que las láminas de metal, las tuberías, el vidrio o similares y un ventilador de 0,75 kW se encuentren disponibles en la localidad.
- Mantenimiento: Se requiere de un pequeño taller.
- Operación: Simple, previa capacitación.
- Costo: Medio a elevado.
- Aplicación: Este tipo de secadora ha sido utilizada en la India para secar 50 kg de arroz por diez a catorce horas, hasta que éste alcance un contenido de humedad de 12%. Otras aplicaciones incluyen pescado en la India y fréjoles en el Brasil.
- Ventajas: En condiciones climáticas apropiadas, proporciona un método alternativo de secado a granel que no requiere del uso de sofisticados sistemas de quemadores. El costo de combustible por tonelada de producto seco es muy bajo. La ventilación de aire forzado acelera el proceso de secado.

- Desventajas: Depende en gran medida del clima. Es mucho más costoso que los sistemas descritos. No se conoce el grado de aceptación por los productores. Requiere de electricidad.

2.2.3. Secadoras mixtas

Las secadoras solares tienen algunas limitaciones. No pueden usarse durante la noche y su nivel de eficiencia es menor en época de lluvias y alta nubosidad. Frecuentemente el producto no se seca por completo en un solo día, lo que trae como resultado su deterioro durante la noche, particularmente debido al desarrollo de hongos. Además, este tipo de secadoras no está diseñado para aumentar en proporción hasta convertirse en unidades más grandes, sin que esto represente problemas asociados con la construcción y la fragilidad de sus estructuras.

Para enfrentar estos problemas, se han diseñado varios tipos de secadoras mixtas que usan combustible para contar con una fuente de calor de reserva cuando ésta se requiera.

Las secadoras artificiales que sólo dependen del calor producido por la combustión de la madera, el gas, el petróleo o la electricidad -y que a menudo tienen ventiladores para superar las limitaciones de las secadoras solares -, presentan, asimismo, nuevos problemas.

Las ventajas de las secadoras artificiales incluyen:

- La no-dependencia de las condiciones climáticas.
- Un mayor grado de control sobre el proceso de secado.
- Una amplia variedad de productos que pueden ser procesados.
- Mayor capacidad.

Las desventajas incluyen:

- a diferencia de las técnicas de secado al sol o del uso de secadoras solares, inicialmente pueden tener menor aceptación cultural debido a que no resultan familiares.
- su costo de producción es mayor debido al uso de combustibles.
- su nivel de inversión inicial es mayor.
- es difícil conseguir localmente el combustible, el equipo, los repuestos o el apoyo técnico.
- los horarios deben ser más rígidos.
- generalmente son más apropiadas para su uso en zonas urbanas o semiurbanas, que tienen un mejor acceso al combustible.

La mayoría de las secadoras de este tipo incorpora un quemador con un intercambiador de calor y un ventilador que permite la circulación de aire a través del producto. Por lo general se les adapta un termostato para controlar la temperatura del aire.

Los tipos más comunes incluyen las secadoras de bandejas (donde el aire caliente pasa a través de una serie de bandejas que contienen el producto); las secadoras rotativas (el producto se coloca en un tambor rotativo a través del cual circula el aire) y a mayor escala; las secadoras de túnel, donde pequeños coches con las bandejas pasan a través de éste.

Si se usa un quemador a gas y el equipo está bien instalado, normalmente no se requiere incorporar un intercambiador de calor. Si bien estas secadoras accionadas a electricidad son más costosas, ofrecen grandes ventajas:

- buen grado de control sobre el proceso.
- total independencia de las variaciones climáticas locales.
- producto final de superior calidad.

Si se piensa en la posibilidad de incorporar sistemas que requieran de más capital, el riesgo debe considerarse. Como en cualquier otro sistema, el valor agregado al producto debe cubrir los costos laborales, de capital y de combustible. Además, es

importante tomar en cuenta el nivel de utilización, los repuestos, el servicio técnico y el manejo administrativo.

2.2.3.1. Secadora Samoa

Tiene dos tuberías de retención de calor o intercambiadores de calor, algunas veces adaptados en un sistema en U o montados debajo de la plataforma de secado. Sus chimeneas están conectadas al final de la tubería para incrementar la corriente de aire. A veces la secadora se adapta con un techo que puede correr sobre rieles para permitir el secado al sol cuando el clima es propicio.

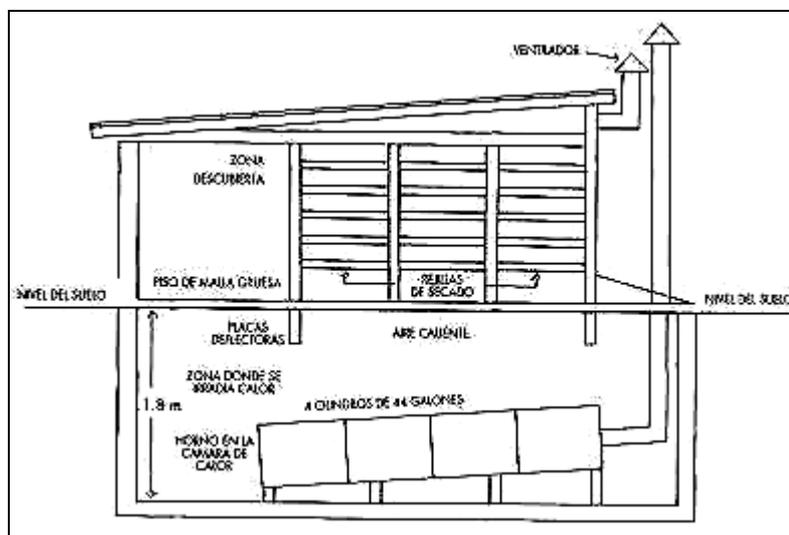


Figura 2. 16. Secadora Samoa.

- Construcción: A cargo del usuario previamente capacitado. Se requiere soldar cilindros de aceite.
- Materiales: Se hallan disponibles localmente la madera, la paja y los cilindros de aceite.
- Mantenimiento: A cargo del usuario (deben llevarse a cabo inspecciones regulares para controlar que las tuberías no se oxiden).
- Operación: Simple.
- Costo: Medio.
- Aplicación: Coco y cocea (Papua Nueva Guinea, Islas Solomon).

- Ventajas: Razonablemente barato en su construcción y se puede obtener un producto de calidad. Pues den usarse combustibles de bajo grado, talas como las cáscaras de coco o las vainas del cacao.
- Desventajas: Depende del adecuado abastecimiento de combustible. La utilización de madera puede originar problemas con el medio ambiente.
- Variaciones en el diseño: Consiste en una caja de fuego y una simple tubería de retención de calor en una gran cámara situada debajo del cultivo, que descansa sobre un piso de listones de madera. Algunos agricultores han instalado ventiladores eléctricos para incrementar el flujo de aire y los niveles de secado. La secadora Tonga opera con principios similares, con la diferencia de que los intercambiadores de calor y la caja de fuego se colocan en un hoyo. Su construcción es trabajosa.

2.2.3.2. Secadora de bandejas

Consiste en una cámara de secado con bandejas apiladas a través de las cuales circula el aire caliente, que es suministrado por un inyector de aire caliente ubicado en la parte inferior.

Existen dos tipos de secadoras de bandejas: las secadoras por tandas y las semicontinuas. La más simple es la secadora por tandas, en la cual la cámara se llena con bandejas que contienen el producto y el aire circula hasta que toda la tanda esté seca.

En una secadora semicontinua un sistema mecánico permite que la bandeja que se seca primero se retire de la secadora (usualmente será la que se encuentra abajo, pues está más cerca de la fuente de calor). Las demás bandejas deben acomodarse dejando un espacio libre en la parte superior, donde se coloca una nueva bandeja con producto fresco.

El sistema por tandas resulta más económico y requiere de menos mano de obra para el llenado y vaciado del producto. Por otro lado, los sistemas semicontinuos son más costosos y complejos de construir y demandan más mano de obra. Tienen la ventaja de ser más eficientes en cuanto a consumo de combustible, además de brindar productos de mejor calidad.

2.2.3.3. Secadora por tandas IRRI

Consta de un cajón de secado con piso perforado donde se coloca el producto. El aire caliente ingresa al cajón de secado a través de un inyector de aire caliente. El cajón puede contener hasta una tonelada de arroz, que reducirá su nivel de humedad de 28% a 14% en un lapso de cinco horas. También hay un modelo alternativo cuyo horno se alimenta con cáscara de arroz, pero que no ha sido usado tan ampliamente. El consumo de energía por tanda de una tonelada es de diez litros de kerosene, más 3,8 litros de petróleo que permitirán el funcionamiento del motor del ventilador.

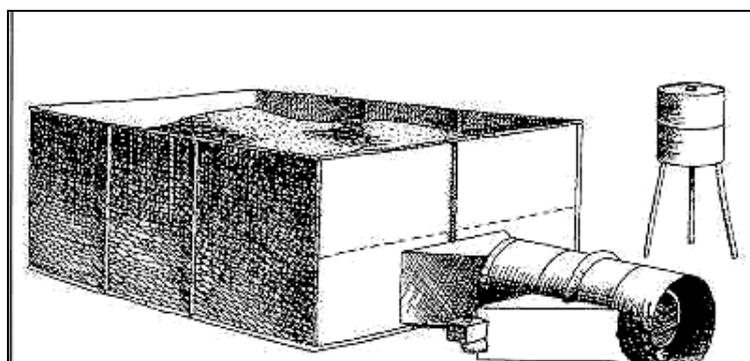


Figura 2. 17. Secadora por tandas.

- Construcción: Puede construirse en un taller mediano.
- Materiales: Ángulos de metal, triplay, piezas especiales para el inyector de aire caliente.
- Mantenimiento: El mantenimiento del quemador requiere de un profesional especializado. El mantenimiento general puede estar a cargo del usuario.
- Operación: Simple.
- Costo: Elevado.
- Aplicación: Esta secadora ha sido utilizada en Filipinas y Paquistán para el secado de arroz.
- Ventajas: Se puede controlar su temperatura. Puede fabricarse y mantenerse en la localidad.

- Desventajas: Requiere de kerosene y electricidad. Es relativamente cara y de poca versatilidad, pues sirve únicamente para el secado de arroz o maíz.
- Detalles de construcción: Se pueden obtener a través del IRRI en Filipinas y de ITDG en el Reino Unido.

Intercambiador de calor Benson

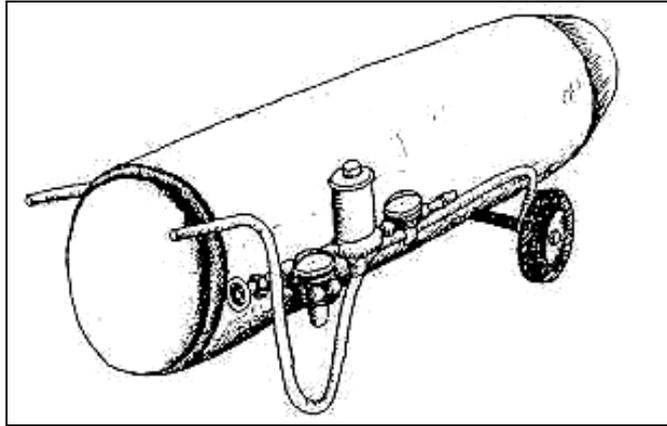


Figura 2. 18. Intercambiador de calor Benson.

- Procesamiento: maíz, arroz, en cáscaras, frutas, carnes y otros.
- Fuente de energía: motor a petróleo/kerosene, motor eléctrico monofásico, quemador automático.
- Salida de calor: 200,00 But.h.
- Consumo de combustible: 1,6 gal/h.
- Capacidad de secado: 500 kg/lote.
- Capacidad: 20 galones.

2.3. Clasificación de los secadores por el flujo del producto

Los secadores de granos se pueden clasificar acuerdo con diversos criterios, tales como el flujo del producto en el secador y la temperatura de secado. La elección de uno de estos criterios depende del enfoque que se quiera dar al asunto. En el caso presente, los secadores se clasificarán según el flujo del producto, como sigue:

Secadores estacionarios:

- Secador de lecho fijo o de capa estacionaria.
- Secador con aire movido por convección natural.

Secadores continuos:

- En cascada o de canaletas.
- De flujos cruzados.
- De flujos concurrentes.
- De flujos contrarios.

Secadores intermitentes.

- Secador combinado.
- Seca – aireación de granos.

2.3.1. Secadores estacionarios

2.3.1.1. Secador de lecho fijo o de capa estacionaria

Los secadores de lecho fijo se componen de cuatro elementos principales que se observan en la Figura 2. 19: sistema de calentamiento del aire, ventilador, cámara de distribución del aire o "plenum", y cámara de secado.

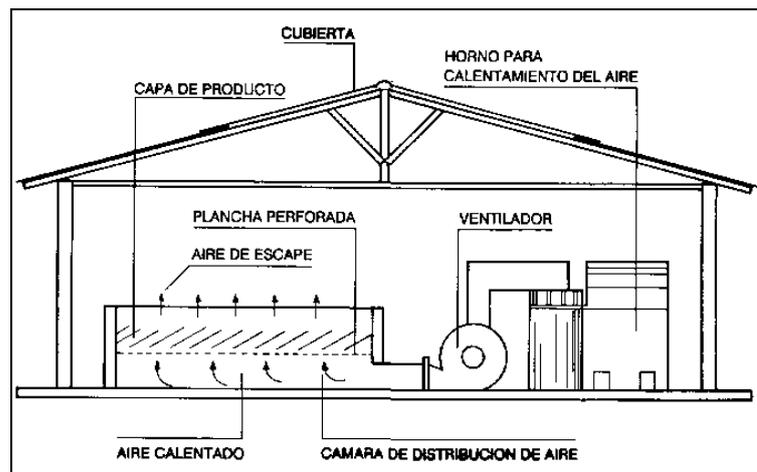


Figura 2. 19. Secador de lecho fijo.

El sistema de calentamiento puede ser de cualquier tipo, siempre que esté dimensionado para aumentar la temperatura del aire hasta los límites recomendados para cada producto y que no sea contaminado por el aire que proviene de la fuente de calor. El ventilador, generalmente, es del tipo centrífugo, por la presión estática que se necesita en este sistema. La cámara de distribución de aire sirve para transformar la presión dinámica del aire en presión estática, uniformando la distribución del aire dentro del secador. La cámara de secado es un recipiente con fondo de plancha de metal perforado, capaz de soportar el peso del producto húmedo. El producto permanece estático en la cámara de secado, mientras que el aire caliente, impulsado mecánicamente por el ventilador, pasa a través de la capa de producto y reduce su contenido de humedad. Los secadores de capa fija, en la mayoría de los casos se proyectan para secar solamente una partida por día. Después del secado, el producto se enfría dentro del mismo secador, para lo cual se interrumpe el suministro de energía al sistema de calentamiento y se deja conectado el ventilador.

“Las principales variables del sistema de secado de partidas en lecho estacionario son: espesor del lecho, contenido de humedad inicial, flujo de aire, temperatura del aire y tiempo de secado.”

El espesor del lecho, generalmente, debe estar entre 0,4 a 0,6 m cuando se trata de granos. Los productos con alto contenido de humedad, como son los tubérculos

cortados en formas apropiadas para el secado, no se deben colocar en capas de más de 0,4 m de espesor, por la dificultad para moverlos. Las capas finas, lo mismo que el movimiento manual o mecánico del producto, sirven para prevenir el secado excesivo cerca de la entrada de aire y disminuir las diferencias de temperatura y de humedad dentro del secador.

Si el espesor del lecho fuera mayor, la diferencia entre la humedad del producto junto a la plancha perforada y la humedad del producto que está situado en la parte superior será muy grande (más de cinco puntos porcentuales de humedad), y puede ocasionar serios riesgos al producto durante el almacenamiento, en especial si la bodega no tiene sistema de ventilación. Por tanto, para disminuir las diferencias de humedad, principalmente en lechos de mayor espesor y con temperaturas del aire más elevadas, es preciso revolver el producto a intervalos determinados.

La temperatura de secado afecta directamente la tasa de secado. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la tasa de evaporación y la irregularidad del contenido final de humedad, si el producto no se revuelve. Con el aumento de la temperatura, la cantidad de granos supersecos no varía mucho, pero la cantidad de granos con alto contenido de humedad es superior³ El flujo de aire influye, principalmente, en la tasa de secado y en la distribución de la humedad, en relación con la profundidad de la capa de producto. Al aumentar el flujo de aire, aumenta la tasa de secado y disminuyen las irregularidades de humedad y temperatura en la capa de producto. El flujo de aire que normalmente se emplea en el secado de productos agrícolas en lecho fijo varía de 0,12 a 0,25 [m³/s.m²]. El tiempo de secado disminuye con el aumento del flujo de aire, pero la eficiencia del secado también disminuye; en condiciones fijas de temperatura, espesor del lecho y flujo de aire, depende también de la humedad inicial y final del producto. Cuanto mayor sea el contenido inicial de humedad o menor sea el contenido final de humedad, mayor será el tiempo de secado.

Algunas ventajas del sistema de secado en capas fijas son: la capacidad del secador es variable; su dimensionamiento, construcción y funcionamiento son relativamente simples; la inversión es menor en relación con los secadores comerciales,

³ BROOKER et al., 1974

principalmente porque se puede construir con materiales corrientes que se encuentran en las cercanías de las propiedades rurales; si la cámara de secado fuera un silo con fondo falso, al término de la cosecha puede servir también para almacenamiento

En la Tabla 2. 5 aparecen algunas recomendaciones en cuanto a temperaturas, espesores del lecho e intervalos de tiempo para revolver el producto, en el secado en lecho fijo.

Tabla 2. 5. Recomendaciones para el secado de productos agrícolas en lecho fijo.

| Recomendaciones para el secado de productos agrícolas en lecho fijo | | | | | | |
|---|----------------|-----------------|----------------------------|---|---|-----------------|
| TEMPERATURA MAXIMA DEL AIRE EN CONTACTO CON EL PRODUCTO, DE ACUERDO CON SU USO FINAL | | | | Espesor de la capa de producto (m) | Intervalo de tiempo para revolver el producto(h) | |
| Productos | Semilla | Comercio | Alimentación animal | | Semilla | Comercio |
| Maní con cáscara | 30 | 35 | - | 1,2- 1,8 | - | - |
| Arroz con cáscara | 40 | 45 | - | 0,25- 0,45 | 2 | 2 |
| Avena | 40 | 60 | 80 | 0,4-0,6 | | |
| Café | - | - | - | 0,4-0,5 | - | 2 |
| Cebada | 40 | 40 | 80 | 0,4-0,6 | - | - |
| Frijol a granel | 40 | 45 | - | 0,4- 0,5 | - | - |
| Frijol en rama | 40 | 45 | - | 0,6- 1,0 | - | 2 |
| Maíz desgranado | 40 | 55 | 80 | 0,4- 0,6 | - | 2 |
| Maíz en mazorca (sin cáscara) | 40 | 55 | 80 | 1,5- 6 | - | 2 |
| Ralladura de yuca | - | 50 | 60 | 0,3- 0,4 | - | 2 |
| Soya | 40 | 50 | - | 0,25- 0,45 | 2 | 2 |
| Sorgo | 40 | 60 | - | 0,4- 0,6 | - | - |
| Trigo | 40 | 60 | 80 | 0,4- 0,6 | - | - |

Referencia: Enciclopedia Terranova 1995.

2.3.1.1.1. Dimensiones del secador

La capacidad del secador se calcula normalmente para la producción máxima esperada. Al conocer la cantidad de producto que hay que secar diariamente, se dimensiona el secador que se necesita.

Las dimensiones óptimas de funcionamiento del secador de capa fija se pueden determinar matemáticamente, mediante una simulación de secado, si se conocen los datos siguientes: tipo de producto y finalidad de su uso, contenidos de humedad inicial y final, y cantidad de producto que se va a secar. No obstante, en vista de la rotativa complejidad de dichos cálculos, se puede simplificar ese dimensionamiento si se conoce el valor de algunas variables del sistema. Así se consideran conocidos el espesor de la capa (véase la Tabla 2. 5) y el flujo de aire (0,12 a 0,25 m³/s. m²).

Luego, conociendo la masa de producto que se va a secar, por partida (mp), el peso específico global del producto (Pp) y el espesor de la capa de producto (H), se calcula el área de la cámara de secado (A) con la ecuación:

$$A = \frac{m}{P_p \cdot H}$$

Ecuación 2. 1.

El flujo de aire de secado (ma) se puede calcular en función del flujo de aire (m_a), dado en m³/s . m, y del área de la cámara de secado:

$$ma = m_a \cdot A$$

Ecuación 2. 2.

La presión estática del ventilador se puede obtener sumando las pérdidas de carga del sistema. Estas pérdidas se producen por la disminución del aire al pasar por los conductos, ampliaciones, camas, válvulas y principalmente, al pasar a través de la capa de producto.

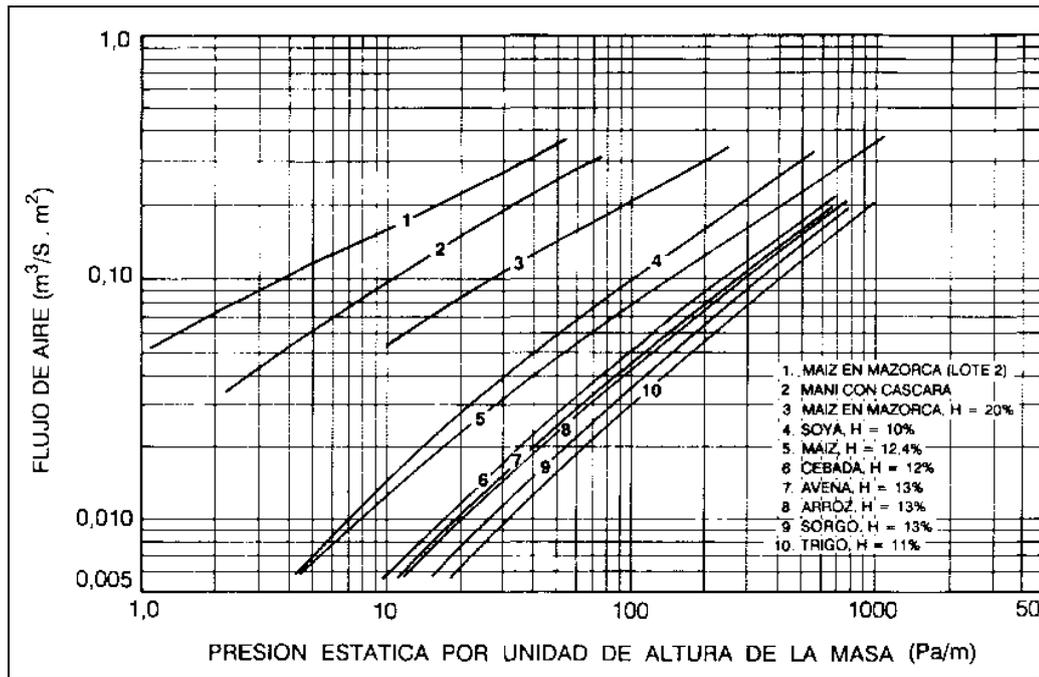


Figura 2. 20. Resistencia de granos y semillas al paso del aire.

Las pérdidas de carga referentes al sistema de distribución del aire se pueden calcular por mecánica de fluidos. Las pérdidas de carga en virtud del paso del aire entre los granos se puede obtener con ayuda del gráfico de la Figura 2. 20, si se conoce el espesor de la capa de producto y el flujo de aire. Por ejemplo, considerando un flujo de aire igual a $0,17 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$, para el arroz, se tiene una presión estática de $615,8 \text{ Pa/m}$. Así, si se conoce la presión estática del sistema y el flujo de aire necesario, se puede calcular la potencia útil que necesita el ventilador. Para calcular la potencia útil del ventilador se acostumbra aumentar el flujo de aire en cerca del 25%, por razones de seguridad.

2.3.1.1.2. Construcción del secador

El secador de capa fija se debe construir en un lugar cubierto, para que pueda funcionar incluso en condiciones meteorológicas adversas y de noche. Hay que construirlo de tal modo que su manejo sea seguro, para evitar riesgos para el operador o perjuicios a la calidad del producto. Hay que tener cuidado de prevenir incendios, tanto en el secador mismo como en las construcciones vecinas. Las partes móviles del motor y del ventilador deben estar protegidas del contacto con personas o animales. La

temperatura del aire de secado se debe controlar mediante un termómetro colocado en la entrada de la cámara de distribución del aire, para evitar que éste se recaliente.

Se pueden emplear diversos materiales en la construcción de conductos y en las cámaras de secado y distribución del aire. Ya existen en el mercado silos metálicos apropiados para funcionar como cámara de secado, con la ventaja de que al final de la cosecha sirven como silos de almacenamiento. Los secadores hechos de madera también son viables, aunque acarrearán riesgos de incendio. En el Brasil parece que una de las opciones más interesantes, del punto de vista económico, es el secador construido de albañilería.

Cabe observar ciertas recomendaciones respecto de los siguientes componentes del sistema:

2.3.1.1.3. Cámara de secado y cámara de distribución de aire

La cámara de secado (Figura 2. 21) debe tener el piso de plancha metálica perforada, de modo que el área perforada sea por lo menos el 10% del área total, para evitar que haya altos valores de pérdida de carga. La cámara de secado puede ser rectangular o circular. El piso de forma rectangular debe tener una relación de 1,5 entre el lado mayor y el lado menor próximo. El piso de forma circular exige mayor cantidad de planchas para su construcción. Si la velocidad del aire que entra en la cámara de distribución es inferior a 1 m/s, la forma del piso deja de tener importancia para el buen desempeño. Para facilitar el mantenimiento del piso de la cámara de secado y del "plenum", y evitar elevadas pérdidas de carga, se puede utilizar una cámara de distribución de aire con una altura de 0,5 m. Los agujeros de las planchas de metal perforadas deben ser tales que no permitan el paso del producto, teniendo en cuenta que interesa más una cantidad elevada de orificios pequeños que pocos orificios de mayor diámetro.

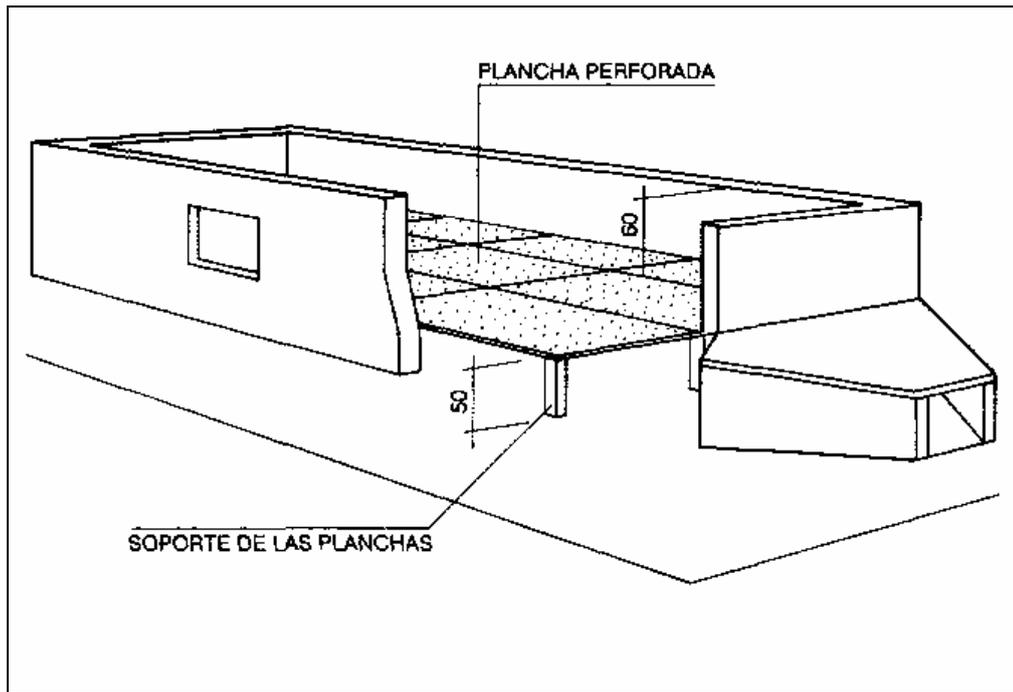


Figura 2. 21. Cámara de secado y cámara de distribución del aire en el secador de lecho fijo.

La estructura para soportar las planchas de metal perforadas y la masa del producto pueden ser de distintos materiales, como albañilería y madera, hierro de construcción y perfiles metálicos. La cámara de secado deberá contar con aberturas laterales para la descarga manual o mecánica del producto y un sistema de boquilla para facilitar el ensacado, en caso necesario. La altura total del secador es de 1,2 m. aproximadamente, de los cuales 0,70 m. corresponden a la altura de la cámara de secado y 0,5 m. a la altura del "plenum". Para facilitar la limpieza de la cámara de distribución de aire del secador, se puede construir el piso de la cámara de secado de modo que una de las planchas perforadas se pueda retirar.

2.3.1.1.4. Campana difusora

Elemento de transición entre la cámara de distribución del aire y el ventilador. El elemento de transición entre la cámara de distribución de aire del secador y el ventilador sirve para uniformar el flujo de aire en el secador. "El ángulo de abertura del elemento de transición, en relación con el eje de simetría del secador, debe ser mayor que 15 [°] para que la pérdida de carga sea despreciable (Figura 2. 22). Así, la longitud

de la transición dependerá del ángulo y de la disponibilidad de espacio para la construcción del secador”⁴. Los conductos de conexión del ventilador con el sistema de calentamiento deben tener dimensiones suficientes para que la velocidad del aire sea inferior a 5 m/s, es decir, 1 m² de área de la sección del conducto por cada 5 m³ /s de aire.

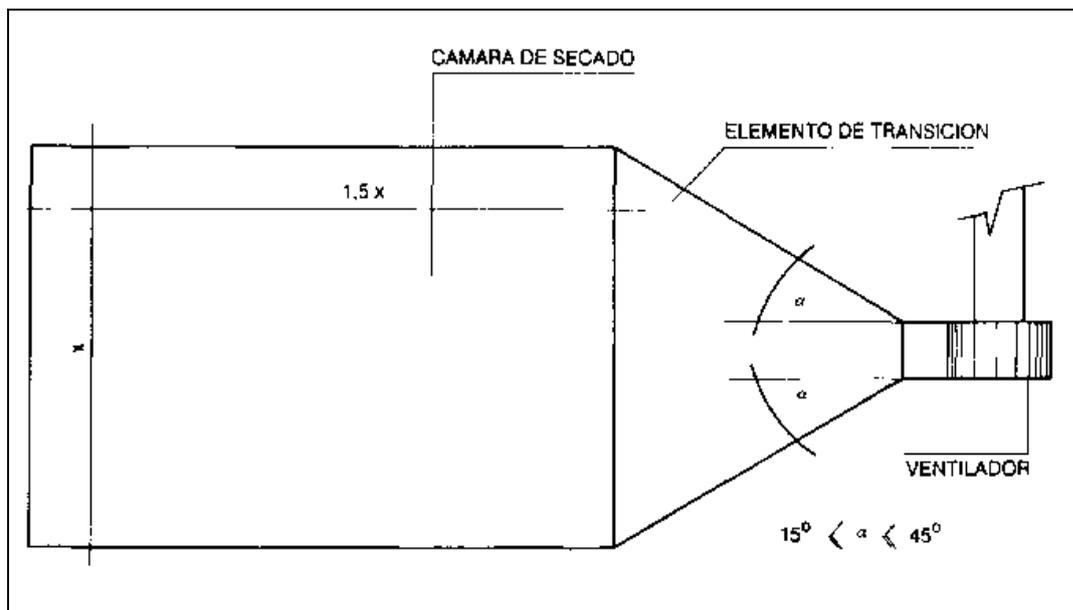


Figura 2. 22. Ángulo de apertura del elemento de transición, entre la cámara de distribución del aire y el ventilador del secador de lecho fijo.

2.3.1.1.5. Funcionamiento y mantenimiento del secador de lecho fijo

Para obtener buenos resultados con el uso del secador de capa fija, hay que observar las siguientes recomendaciones:

- Las temperaturas y los espesores de la capa, para varios productos, aparecen en la Tabla 2. 5. La temperatura de secado depende del fin que se dará al producto.
- La superficie de la capa de producto se debe nivelar con un rastrillo de madera, después de cargado el secador, para evitar la irregularidad en el flujo de aire.

⁴ SILVA y LACERDA FILHO, 1984.

- Se debe evitar al máximo la compactación del producto.

- Se debe revolver el producto a intervalos predeterminados, para evitar la irregularidad en la humedad final del producto, principalmente con temperaturas superiores a 45°C. Para esto, el operador debe desconectar el ventilador y mover el producto con una pala o con rastrillo de madera.

- El término de la operación de secado depende de varios factores, tales como espesor de la capa, humedades Inicial y final del producto, flujo de aire y temperatura de secado; el operador deberá contar con equipos capaces de determinar el contenido de humedad final del producto. Si el producto está excesivamente seco, el productor perderá dinero al comercializar sobre la base del peso húmedo. Si el producto estuviera demasiado húmedo, quedará expuesto a deterioro durante el almacenamiento.

- Al término del secado, se debe interrumpir el calentamiento del aire o abrir todas las entradas de aire frío en la fuente de calor, y dejar el ventilador conectado hasta que la masa de granos alcance una temperatura próxima a la del ambiente. En los secadores con horno de albañilería se debe interrumpir el abastecimiento de leña cuando el contenido medio de humedad del producto llegue a alrededor de uno a dos puntos por ciento de humedad por encima del valor recomendado para almacenarlo, manteniendo el ventilador conectado y haciendo pasar todo el aire por el horno. De este modo, se aprovecha la energía almacenada en las paredes de las tuberías y del horno para terminar el secado de producto, evitando los choques térmicos de enfriamiento.

- Se debe limpiar el secador después de secar cada partida, retirando los residuos de productos agrícolas que queden sobre la plancha perforada.

2.3.1.2. Secador con aire movido por convección natural

El secado artificial es una alternativa que ha dado buenos resultados, pero, en países subdesarrollados o en desarrollo, el uso de secadores ha quedado limitado a las regiones de mayor desarrollo agrícola. El secado con aire natural o calentado, en muchos casos no se puede usar, porque la relación inversión / producto es muy elevada, o incluso por falta de energía eléctrica para accionar el ventilador.

En la mayoría de los secadores el aire pasa por la masa de granos, forzado por medio de ventiladores. Sin embargo, hay secadores en los que el aire se mueve por acción de las diferencias de presión, producidas por la diferencia de temperatura y humedad, entre el aire de secado y el aire ambiente. Estos secadores se denominan secadores con movimiento del aire por convección natural y han tenido éxito en países de África y Asia; han beneficiado principalmente a los agricultores de bajas producciones, con poca capacidad técnica y sin capital para adquirir equipos de secado.

Los secadores con movimiento del aire por efecto de la convección natural se pueden construir con materiales característicos de la región y mano de obra poco especializada. Además, utilizan como combustible la leña o los subproductos de la propiedad rural, talas como la caña de maíz, corontas, paja y demás residuos agrícolas.

El primero de tales secadores de que se tiene noticia es el secador de tipo Samoa, que sirve para secar copra. En este secador se coloca la copra sobre un piso perforado, bajo el cual se quema leña para calentar el aire que pasa por la masa granular por convección natural. El inconveniente de este secador es la contaminación del producto por el humo, además de los daños causados al producto por el calor, pues aquél queda directamente encima del fuego. Entre 1961 y 1963, se hicieron modificaciones al secador Samoa y se le usó en el secado de almendras. Este secador pasó, entonces, a llamarse "Brook" o de Tipo T (Figura 2. 23).

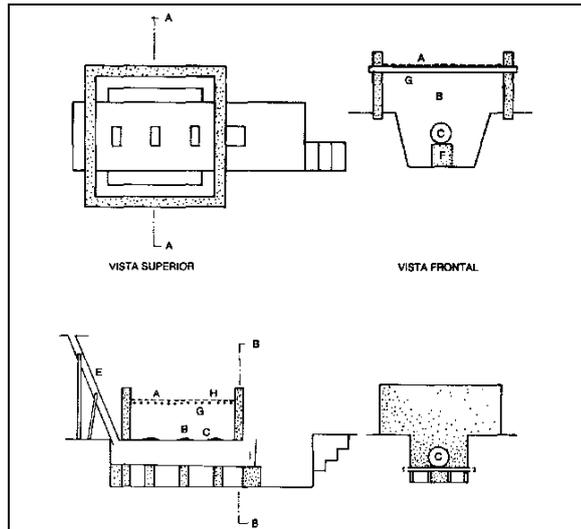


Figura 2. 23. Esquema del secador con aire movido por convección natural (BROOK, 1964 ab).

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- E. Chimenea para el escape de gases de combustión
- F. Entrada de aire
- G. Base de sustentación del piso perforado
- H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mmx15 m.)
- I. Puerta de entraba de la cámara de combustión

Las principales adaptaciones que se realizaron fueron las siguientes:

- adaptación de un intercambiador de calor;
- aumento de la altura del piso perforado en rotación con el intercambiados, para obtener mayor uniformidad en la temperatura del aire de secado e impedir el deterioro del producto por acción del calor;
- construcción de una chimenea para la eliminación de los gases de combustión;
- construcción de las paredes del secador en adobe.

Otros investigadores propusieron la adaptación de intercambiadores de calor suplementarios, con el fin de aumentar la superficie de intercambio de calor, con lo que mejoraría la eficiencia térmica del secador (Figura 2. 24).

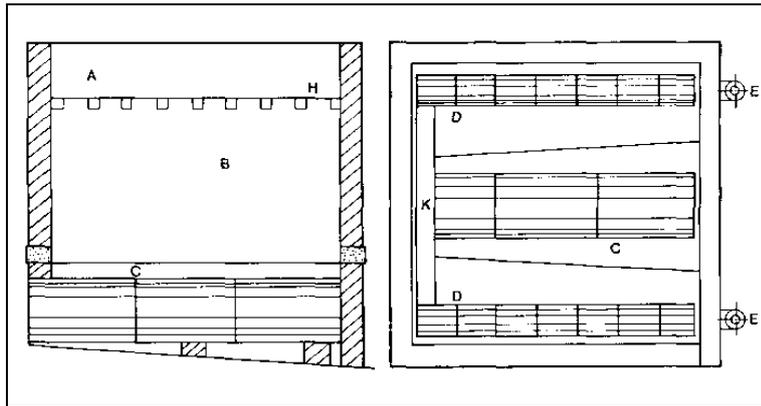


Figura 2. 24. Esquema del secador con aire movido por convección natural (BERNAL, 1982).

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- D. Intercambiadores de calor adicionales
- E. Chimenea para el escape de gases de combustión
- G. Base de sustentación del piso perforado
- H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mmx15 m.)
- K. Cámara de distribución de los gases de combustión

Los parámetros que deben considerarse en la construcción de secadores del tipo Brook son:

- Dimensiones de la entrada de aire. La entrada de aire tiene un efecto significativo sobre el flujo de aire y hay que dimensionarla de manera que la velocidad del aire en ese punto sea inferior a 0,25 m/s;
- Espesor de la capa de granea. El flujo de aire disminuye a medida que aumenta el espesor de la capa de granos;
- Distancia entre el intercambiador de calor y el piso perforado que sostiene el producto. El flujo de aire aumenta linealmente con el incremento de la distancia entre el intercambiador y el piso perforado, y con la diferencia entre la temperatura del aire de secado y la del aire ambiente (se recomienda una distancia mínima de 0,8 m. para evitar el sobrecalentamiento de producto); y

- Superficie de intercambio de calor. El aumento de la superficie de intercambio de calor aumenta la eficiencia térmica del secador y reduce al mínimo la diferencia de temperatura del aire de secado bajo la capa de granos.

Los resultados de las investigaciones⁵ señalan que la colocación de una pirámide truncada sobre la cámara de secado (Figura 2. 25) mejora significativamente el desempeño del secador en cuestión, pero dificulta la operación de revolver el producto.

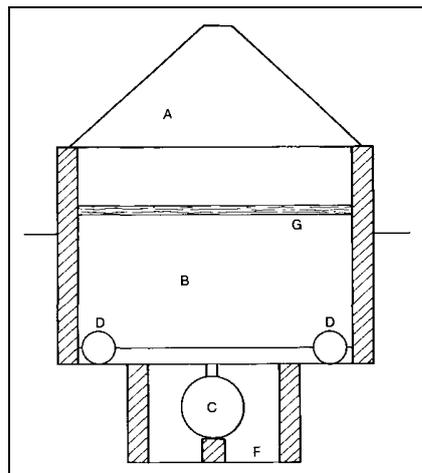


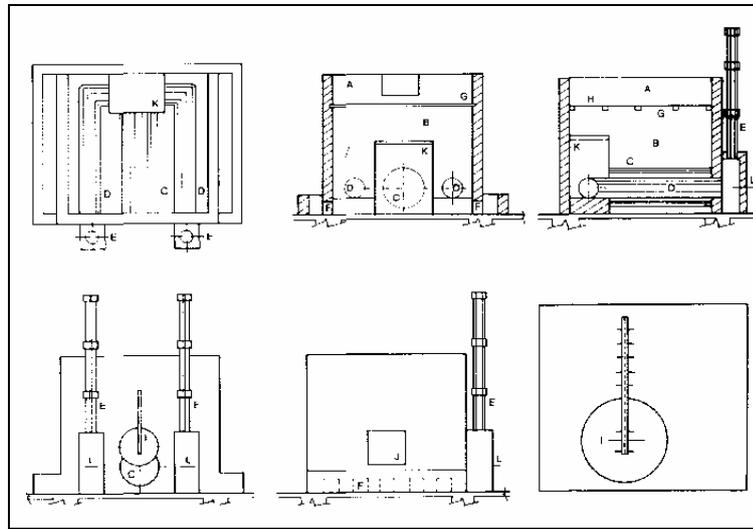
Figura 2. 25. Esquema del secador con aire movido por convección natural (BERNAL. 1982).

La entrada de aire situada solamente en el frente del secador determina que la distancia que debe haber entre el piso perforado y el intercambiador de calor sea de un metro, por lo menos. Esto es para que exista una temperatura uniforme del aire de secado debajo de la capa de producto que se está secando.

Los secadores con aire movido por convección natural presentan problemas de uniformidad de temperatura y flujo de aire, principalmente por la posición de la entrada de aire en la parte frontal del secador (al lado del quemador). Además, su eficiencia térmica es baja, puesto que la mayor parte de la energía se elimina por las chimeneas, junto con los gases de combustión. En el Centro Nacional de Capacitación en Almacenamiento - CENTREINAR, se construyó una versión del secador de tipo Brook

⁵ BERNAL, 1982.

con innovaciones respecto de la entrada de aire ambiente a ser calentado en el quemador - intercambiador de calor.



En la Figura 2. 26. Secador con aire movido por convección natural.

En la Figura 2. 26. Esquema del secador con aire movido por convección natural⁶.

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiador de calor
- D. Intercambiadores de calor adicionales
- E. Chimenea para el escape de gases de combustión
- F. Entrada de aire
- G. Base de sustentación del piso perforado
- H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mm. x 1,5 m.)
- I. Puerta de entrada de la cámara de combustión
- J. Puerta de inspección de la cámara de uniformación
- K Cámara de distribución de los gases de combustión
Regulación de los gases de la combustión

⁶ PEREIRA et al., 1985.

En este modelo, el quemador-intercambiador de calor se construye con tambores de 0.87 m. de altura por 0,58 m. de diámetro (tambores de 200 litros), sin fondo ni tapa y unidos entre si. El quemador-intercambiador de calor se fija en la pared anterior del secador y en una cámara de distribución de gases de combustión construida en la parte posterior del secador, donde están conectados los intercambiadores de calor adicionales.

Los intercambiadores de calor adicionales, contruidos con tambores de 0,26 m. de diámetro por 0,35 m. de altura, también unidos entre si, van desde la cámara de distribución hasta las chimeneas instaladas en la parte anterior del secador. Las chimeneas se construyen con tubos de barro de 0,10 m. de diámetro.

El quemador-intercambiador se debe instalar en posición inclinada, más alto en la parte posterior del secador, donde se fija en la cámara de distribución de los gases de combustión, para facilitar la eliminación de éstos. Lo mismo se debe hacer con los intercambiadores de calor adicionales, los cuales deben quedar más altos en su unión con las chimeneas. En el quemador se debe colocar una parrilla hecha de hierro de construcción de 1/4", entrelazados, para evitar el contacto directo entre el material que se quema y el tambor. Así, se aumenta la vida útil del tambor y se facilita la combustión.

En la entrada del quemador-intercambiador de calor se coloca una puerta con sistema de regulación, para cerrar parcialmente la entrada del quemador. El propósito de esto es evitar la salida de gases de combustión y también la acción del viento que aumenta la combustión y el consumo de leña. En cuanto a las dimensiones del secador (ancho y largo), sobre la base de los trabajos de investigación de ADEYEMO (1979); BERNAL (1982); BOLDUC (1978); BROOK (1964); PEREIRA et al. (1985), y RYU (1976), no se recomienda que dichas medidas sean superiores a 3 m. por falta de datos para el dimensionamiento.

Operación de secado

La primera etapa de funcionamiento del secador es la de colocar, sobre la base con la malla, una capa de producto para secar. Se enciende el fuego sobre la parrilla,

utilizando leña o cualquier otro residuo agrícola, y se mide con un termómetro de mercurio la elevación de temperatura del aire de secado, debajo de la base con la malla. El bulbo del termómetro se coloca en la masa de granos, de tal modo que quede próximo a la malla galvanizada que sostiene al producto. Bastan 20 minutos, aproximadamente, para que el aire se caliente a la temperatura de secado que se desea.

El tiempo de secado es función del tipo de producto, altura de la capa y temperatura del aire de secado.

Es preciso revolver el producto para que el secado sea uniforme, sin diferencias de humedad entre la parte inferior y la superior de la capa. Además, la acción de revolver el producto durante el secado mejora significativamente la tasa de secado. Cuanto mayor es la temperatura del aire de secado, más frecuente debe ser la operación de revolver la capa para evitar daños al producto que queda en contacto con la malla. La eficiencia térmica del secador aumenta si se seca el producto en partidas sucesivas.

2.3.2. Secadores continuos

2.3.2.1. Secadores en cascada o de canaletas

Los secadores en cascada se componen de una serie de canaletas invertidas, en forma de V, dispuestas en filas alternadas o cruzadas dentro del cuerpo del secador, con intervalos de 0,30 m., aproximadamente. Los granos bajan por acción de la gravedad y caen sobre las canaletas invertidas. El aire de secado entra por una fila de canaletas y sale por las otras inmediatamente adyacentes (superior e inferior). De este modo, al bajar por el secador, los granos se mueven tanto en el mismo sentido que el aire, como en sentido contrario. En la Figura 2. 27 aparece un esquema de distribución de canaletas alternadas, en secadores de tipo cascada, y en la Figura 2. 28 hay un esquema de secador de canaletas cruzadas.

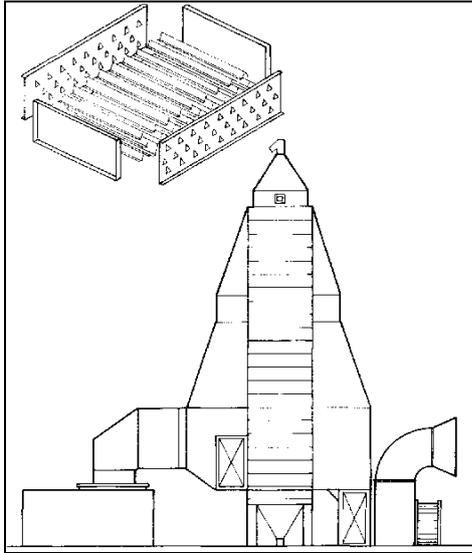


Figura 2. 27. Esquema de distribución de canaletas paralelas en secadores de tipo cascada.

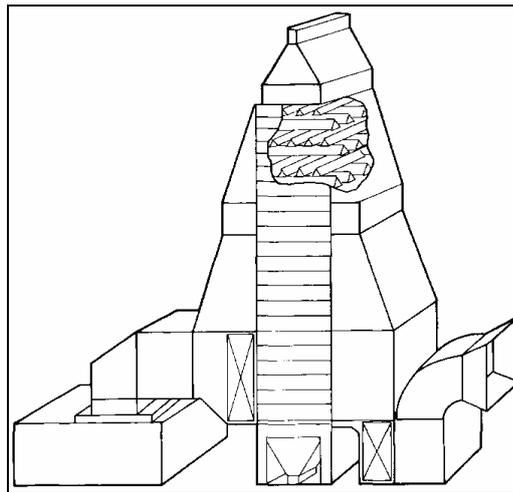


Figura 2. 28. Esquema de distribución de canaletas en un secador de canaletas cruzadas (KREYGER 1972).

Los secadores en cascada, se cuentan entre los primeros modelos de secadores continuos que se usan comercialmente. En los países desarrollados se les ha ido reemplazando paulatinamente, por su elevado costo inicial, problemas de contaminación y problemas de manejo.

El principal inconveniente de los secadores en cascada es el elevado costo inicial; la cantidad de material que se necesita para confeccionar las canaletas es el factor que más contribuye a elevar los costos.

Los secadores en cascada se consideran contaminantes de ambiente por la velocidad relativamente alta que tiene el aire a la salida de los ductos. En consecuencia, las impurezas más livianas que se encuentran en la masa de granos son arrastradas al exterior del secador. En los países desarrollados, las leyes más rigurosas en ese campo han obligado a los fabricantes a instalar filtros a la salida del aire de estos secadores, en cumplimiento de las normas de control de la contaminación ambiental.

Los secadores en cascada utilizan flujos de aire menores que los que se emplean en otros tipos de secadores continuos. Los flujos de aire más elevados determinan velocidades altas del aire a la salida de los ductos, superiores a la velocidad final de la mayoría de los granos. Por esto, muchos granos pueden verse arrastrados por el aire de escape, con la consiguiente pérdida del producto. El uso de flujos de aire más bajos hace que el secador de este tipo sea energéticamente eficiente, pero de capacidad limitada para el secado.

Los secadores en cascada exigen ciertos cuidados en cuanto al flujo del producto. Cuando pasan por el secador granos limpios con relativa rapidez, se obtiene un secado parejo, pero si los granos llevan impurezas se dificulta su flujo. En tales casos (comunes en las unidades almacenadoras), el secado será disparejo. Del mismo modo, cuando se reduce el flujo del producto por el secador para secar granos más húmedos en una sala pasada, es corriente obtener un secado disparejo. Se estima que ésta es la base para limitar la reducción del contenido de humedad de un producto en 5,0 puntos por ciento en cada pasada por el secador⁷.

⁷ (HAWK et al., 1978).

2.3.2.2. Secador de flujos cruzados

El secador de flujos cruzados es el que más se usa en el mundo, gracias a su popularidad en los Estados Unidos. Dicha popularidad se deriva de los principios simples de su construcción y funcionamiento, junto con el costo inicial más moderado, en comparación con otros tipos de secadores.

Los secadores de flujos cruzados se caracterizan por el paso del aire perpendicular a una capa de granos, que se mueven entre planchas perforadas. Esos secadores pueden tener diversas configuraciones y la forma comercial más común es el secador de tipo torre fijado a una base. La torre puede ser circular, con la capa de granos rodeando el quemador y el ventilador, o bien rectangular, con columnas de granos en dos o en los cuatro costados. En la Figura 2. 29 se presentan esquemas de estos tipos de secadores

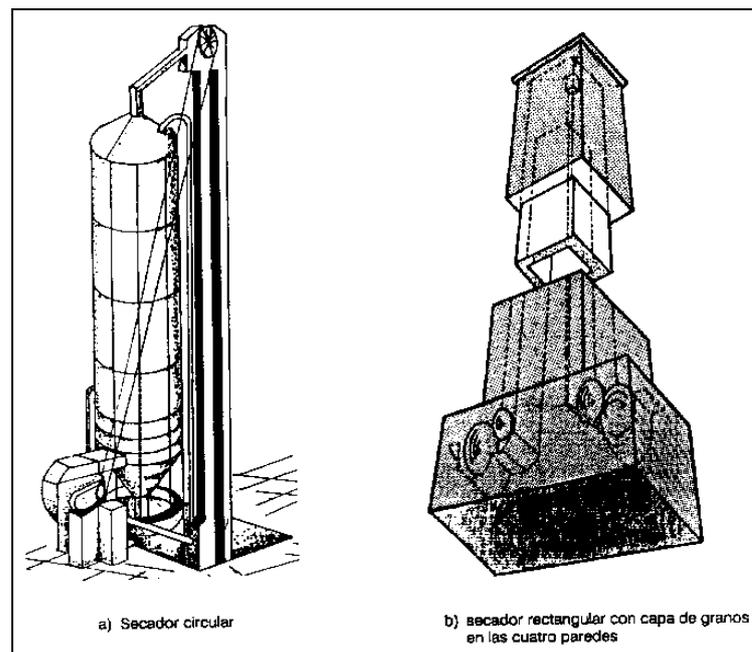


Figura 2. 29. . Esquemas de secadores de flujos cruzados de tipo torre.

El secador del tipo de torre rectangular también puede presentar varias columnas dispuestas unas al lado de otras. En la Figura 2. 30 se presenta otro esquema de secador de flujos cruzados, junto con el tipo de torre rectangular de varias columnas.

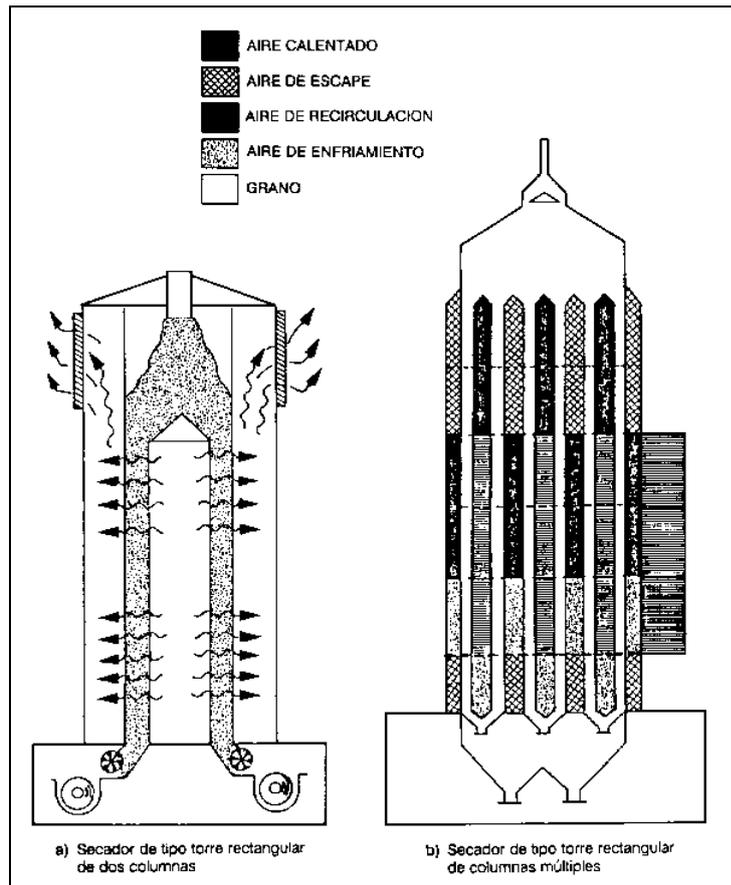


Figura 2. 30. Esquema de secadores de flujos cruzados.

Algunos secadores de flujos cruzados son de construcción horizontal, con las columnas de granos colocadas a los dos lados de la cámara de distribución de aire. Se les puede usar como secadores de etapas múltiples, o como secadores continuos. Los secadores de flujos cruzados horizontales se pueden montar unos sobre otros, cuando se quiere secar una mayor cantidad de granos. Los módulos pueden funcionar a la misma temperatura o a temperaturas diferentes. Algunos módulos intermedios pueden servir de zonas de reposo, para lo cual basta con desconectar la fuente de movimiento del aire. El módulo de base se usa, generalmente, como enfriador. Se ve un esquema de este tipo de secador, en la Figura 2. 31.

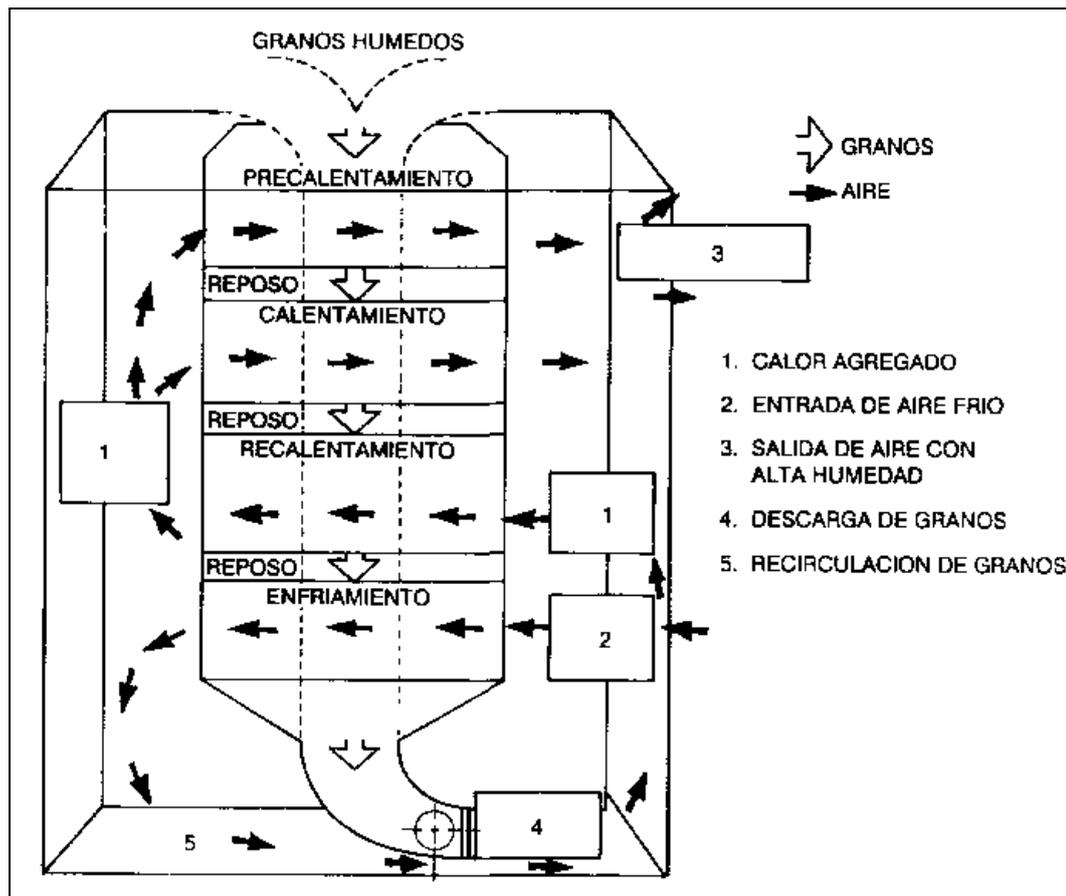


Figura 2. 31. Esquema de un secador de flujos cruzados de construcción horizontal de varias etapas.

En el secador de flujos cruzados convencional, aire y granos se mueven en direcciones perpendiculares. Los granos próximos a la entrada de aire tienden a researse y recalentarse; los que quedan cerca de la salida, en la columna, tienden a quedar húmedos. La diferencia de humedad a través de una columna de 0,30 m. puede alcanzar puntos porcentuales de humedad elevados, dependiendo de los parámetros de secado.

La optimización de desempeño de un secador de flujos cruzados se puede obtener mediante el manejo adecuado de los parámetros del secador: altura, profundidad y espesor o ancho de la columna, flujo de masa, temperatura y velocidad del aire⁸. La profundidad del secador influye solamente en su capacidad total, siempre que haya simetría, en esa dimensión, en cuanto a la temperatura y humedad de los granos. La

⁸ BAUER et al., 1978.

altura de la columna y el flujo del producto determinan el tiempo de residencia de los granos dentro del secador. Así, en el proceso de optimización del secador de flujos cruzados hay cuatro parámetros principales que investigar: espesor de la columna, tiempo de residencia, flujo de aire y temperatura de secado.

Se han hecho algunas tentativas de reducir las diferencias de temperatura y humedad, pero sin influir significativamente en la capacidad y eficiencia del secador. Se investigaron, inicialmente, los efectos de invertir el sentido del flujo de aire en la mitad de la zona de secado. Aun cuando este cambio en el secador convencional dio como resultado una leve disminución en la eficiencia y capacidad del secador, se observó una reducción del 60 a 75 por ciento en la diferencia de humedad a través de la columna⁹.

La recirculación de parte del aire del escape es un adelanto en los secadores de flujos cruzados. Generalmente se recircula cerca del 50 por ciento del aire total, en el secado de maíz. Por recirculación se entiende la reutilización total o parcial del aire de escape en el secado, pasándolo o no por una fuente de calentamiento. En los secadores que funcionan con esta técnica, el aire saturado proveniente de la primera etapa de secado sale al ambiente. El aire que sale de las etapas siguientes de secado se mezcla con el aire que pasa por la zona de enfriamiento y se dirige a la fuente de calentamiento, para usarse nuevamente. En la Figura 2.16 se presenta un esquema de secador de flujos cruzados modificado, con inversión del flujo de aire y recirculación de parte del aire de escape. El principal beneficio de la recirculación de una parte del aire está en el aumento de la eficiencia térmica del secado. Así, pues, se ha observado en un secador modificado, una reducción del 50 por ciento en el consumo de energía por unidad de agua evaporada¹⁰. Otras investigaciones señalaron una economía del orden de 30 a 42 por ciento, cuando recircula cerca del 50 por ciento del aire de escape¹¹.

⁹ (CONVERSE, 1972; LEREW, et al., 1982; PAULSEN y THOMPSON, 1973; MOREY y CLOUD, 1973).

¹⁰ (LEREW et al., 1972).

¹¹ (BAKKERARKEMA et al., 1972 y 1979; BAUER et al., 1977).

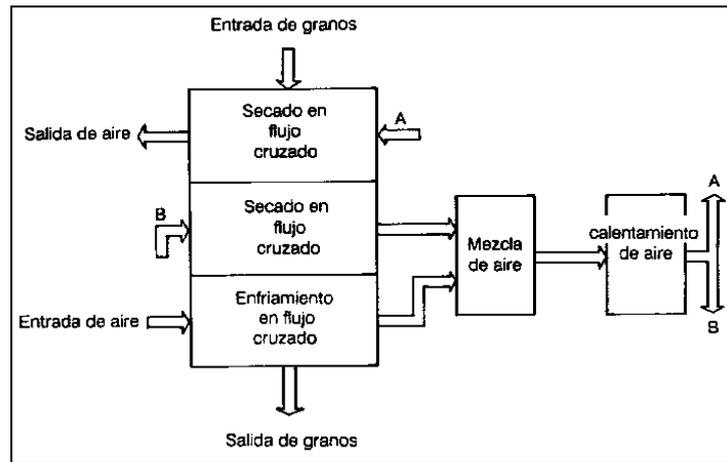


Figura 2. 32. Diagrama de un secador de flujos cruzados con inversión y recirculación de aire (BROOKER et al., 1977).

La inversión de sentido del flujo de aire no es posible en ciertos secadores de flujos cruzados, porque las columnas de granos están situadas alrededor de la fuente de calor. En tales secadores se hace uso de un dispositivo que alterna la posición de los granos respecto del aire de secado; los granos más húmedos pasan hacia el interior del secador y los más secos pasan a la parte externa. En la Figura 2. 33 se presenta un esquema de este dispositivo.

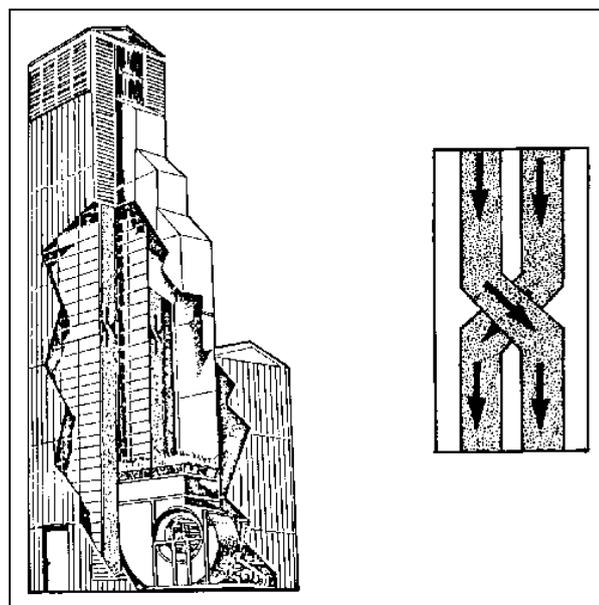


Figura 2. 33. . Esquema del dispositivo para alternar la posición de los granos en las columnas de los secadores de flujos cruzados.

La utilización de zonas de reposo es recomendable en los secadores de flujos cruzados. En esas etapas, la humedad se redistribuye al interior de los granos, lo que facilita su evaporación en la etapa de secado siguiente. Con la introducción de zonas de reposo en un secador de flujos cruzados para secar soya, de 20,5 a 12,1%, se previó una reducción de alrededor de 40 por ciento en el consumo de energía específica¹². Aun así, los efectos del uso de zonas de descanso en los secadores de flujos cruzados no se conocen del todo, por lo que deberán ser objeto de investigaciones futuras. Un esquema de secador de flujos cruzados, con inversión del sentido del flujo de aire de escape y etapas de descanso, aparece en la Figura 2. 34.

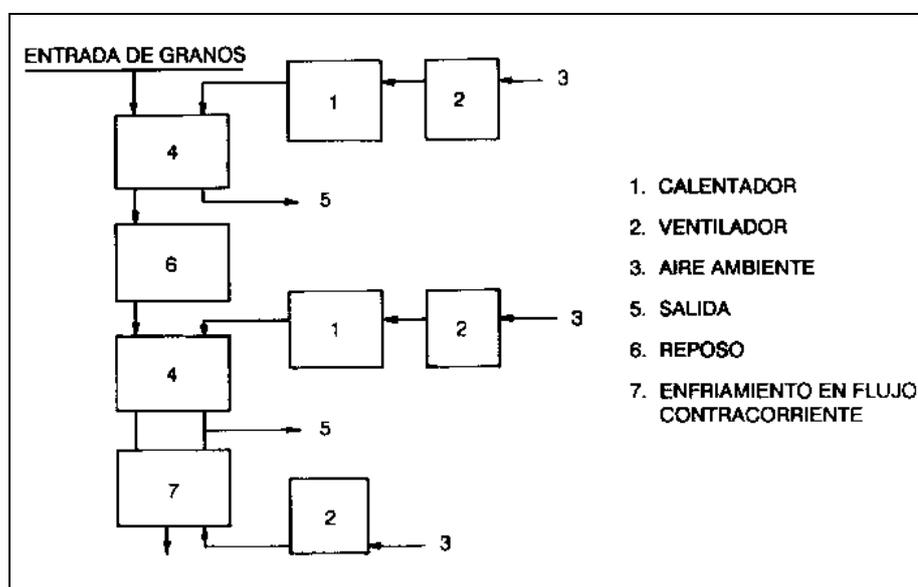


Figura 2. 34. Diagrama de un secador de flujos cruzados con inversión y recirculación de parte del aire de secado y con zonas de descanso (DALPASQUALE, 1981).

2.3.2.3. Secador de flujos paralelos

El secado de granos en flujos paralelos es una técnica que apareció en el comercio en los años setenta, aunque sus principios se conocían desde los años cincuenta. La introducción en el mercado de los secadores de flujos paralelos se retrasó a causa del bajo costo de la energía en la época de su desarrollo, además de la

¹² (DALPASQUALE, 1981).

disponibilidad de secadores de construcción más barata. Con el advenimiento de la crisis energética mundial, a partir de 1973 la demanda de secadores de flujos paralelos aumentó notablemente en los países desarrollados. La razón de su popularidad es la elevada eficiencia energética característica de dichos secadores. En un secador de flujos paralelos, aire y granos fluyen en la misma dirección. Hay altas tasas de evaporación en la parte superior de la capa de granos, donde el aire caliente se encuentra con los granos más húmedos. Los intercambios intensos y simultáneos de energía y masa a la entrada de aire o de granos, causan un rápido descenso de la temperatura inicial del aire de secado, así como en el contenido de humedad de los granos. Por este motivo, la temperatura del producto permanece muy por debajo de la temperatura inicial del aire de secado. Dichas temperaturas alcanzan valores muy próximos, a medida que el aire y el producto se mueven hacia abajo por el secador. En consecuencia, el potencial de secado disminuye, en virtud de la reducción de temperatura del aire y del aumento de su humedad relativa, con el consiguiente aumento de la humedad de equilibrio del producto. En la Figura 2. 35 se ve un esquema de un secador de flujos paralelos.

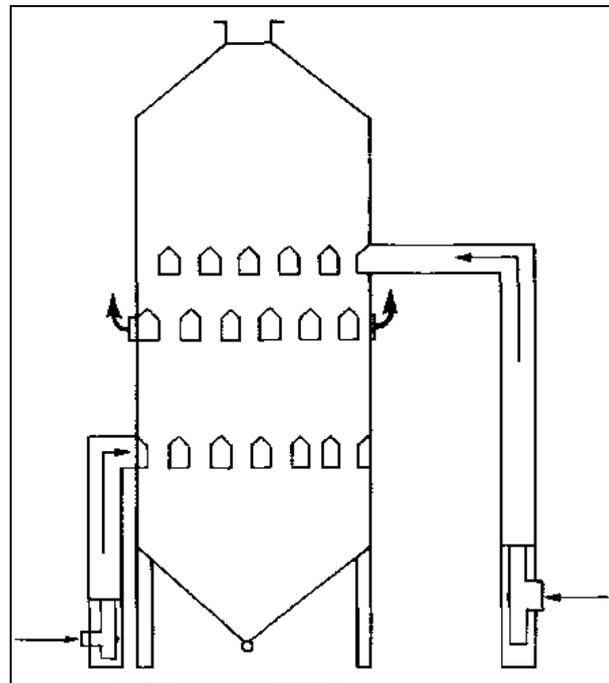


Figura 2. 35. Esquema de secador de flujos paralelos.

En el secador de flujos paralelos todos los granos se someten al mismo tratamiento de secado. En consecuencia, no hay diferencia de humedad entre los granos,

como sucede con los secadores de flujos cruzados. La reducción continua de la temperatura del aire, hasta la parte inferior de la cámara de secado, alivia la tensión impuesta a los granos durante el secado y disminuye la tendencia a los daños mecánicos durante el transporte posterior.

El secador básico de flujos paralelos se compone solamente de una sección de secado y una sección de enfriamiento en flujos contrarios. Los modelos de una sola etapa, que tienen una sección de secado únicamente, son de capacidad limitada, si se trata de eliminar más de ocho puntos de humedad. En tales casos, los secadores paralelos de una etapa someten al producto a un tratamiento de secado relativamente severo, por las bajas velocidades del producto dentro del secador.

Se han construido secadores de flujos paralelos de dos y tres etapas. El aumento en el número de etapas permite el uso de temperaturas más elevadas del aire de secado, además de subir la velocidad del producto dentro del secador. Otra característica importante de este tipo de secador es la presencia de etapas de reposo, colocadas entre dos cámaras sucesivas de secado. En estas etapas de reposo, la humedad se redistribuye al interior de los granos calentados y la tensión térmica disminuye aún más. Algunos estudios de simulación matemática del secado señalaron la conveniencia de agregar una zona de descanso entre la última cámara de secado y la de enfriamiento, para acrecentar la evaporación de humedad en esta última cámara. Para no elevar demasiado la altura del secador, se propuso reducir la altura de las zonas de reposo entre cámaras de secado, en favor de la etapa de reposo instalada antes del enfriamiento. Quedó en claro también que, si se trata de secadores de etapas múltiples, los granos se deben someter a períodos de reposo más prolongados, a medida que pasan por las sucesivas cámaras de secado, lo que indica la necesidad de contar con zonas de descanso de diferentes alturas en el secador de flujos paralelos y etapas múltiples. En la Figura 2. 36 se puede ver un esquema de un secador de flujos paralelos de tres etapas.

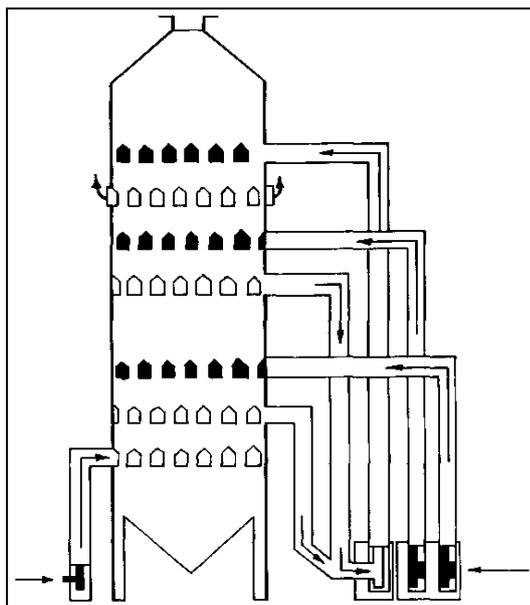


Figura 2. 36. Esquema de secador de flujos paralelos de tres etapas, con enfriador en flujos contrarios.

Se ha observado que el uso de secadores de flujos paralelos y etapas múltiples aumenta la capacidad de secado del sistema, además de propiciar la obtención de un producto final de mejor calidad.¹³ En los secadores de dos y tres etapas se observan las siguientes ventajas respecto de los de una sola etapa: a) mayor capacidad de secado; b) mejor calidad del producto final; c) mayor flexibilidad de adaptación a diferentes productos; y d) mayor eficiencia.¹⁴

Se han usado varios productos para probar los secadores de flujos paralelos. Los estudios sobre secado de maíz con alto contenido de humedad, en secador de flujos paralelos, señalaron que el aire de secado a 220 °C no afectó significativamente el valor nutritivo del maíz. Se supone que a temperaturas superiores se podría evitar el daño térmico con el uso de una proporción adecuada entre los flujos de granos y los de aire¹⁵. En experiencias realizadas con trigo se llegó a resultados parecidos¹⁶.

¹³ (BAKKER-ARKEMA et al., 1977).

¹⁴ (WESTELAKEN y BAKKER-ARKEMA, 1978; MUHLBAUER et al., 1978).

¹⁵ (MUHLBAUER et al., 1971).

¹⁶ (AHMADNIA, 1977; BAKKERARKEMA et al., 1977).

Se secaron semillas de soya en modelos de secador de flujos paralelos, de una sola etapa y de etapas múltiples. En ninguno de los casos se observaron alteraciones significativas en la extracción y calidad del aceite, ni en el poder germinativo de las semillas¹⁷.

2.3.2.4. Secador de flujos contracorrientes

Los principios del secado en flujos contracorrientes se emplean en la industria para dimensionar los enfriadores de los secadores de flujos contrarios.

El enfriador de flujos contracorrientes se usa en los secadores paralelos, porque el método evita los choques térmicos indeseables en los granos, puesto que la diferencia de temperatura entre el aire y el producto permanece prácticamente constante en toda la cámara de enfriamiento.

El secado en silos se puede considerar secado en flujos contrarios, cuando se utiliza un tornillo sin fin que gira lentamente sobre el fondo perforado y retira los granos parcialmente secos, los que pasan a otro silo. La zona de secado permanece prácticamente estacionaria y próxima a la entrada del aire de secado en la masa de granos. El enfriamiento posterior de los granos se efectúa en otro silo, donde se termina el secado. En la Figura 2. 37 hay un esquema de dicho sistema de secado.

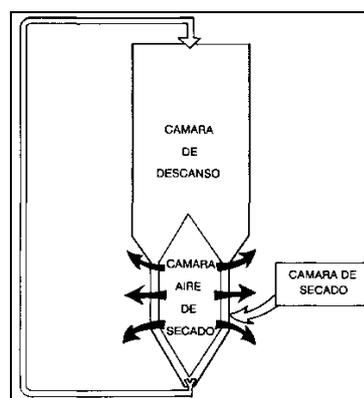


Figura 2. 37. Secado en flujos contrarios, en silos.

¹⁷ (KALCHIK, 1977; DALPASQUALE, 1979).

El secado de granos en silos provistos de este tipo de mecanismo representa un adelanto y presenta las siguientes características:

- no hay pérdida de energía en el secado de granos con humedad inferior a la deseada, puesto que no se permite que el producto llegue a la humedad de equilibrio;
- los granos están sujetos a temperaturas elevadas mientras pierden humedad a una tasa razonable. Con esto se evita que el producto alcance la temperatura del aire de secado. Comparado con el sistema de secado en partidas, en silos, el tiempo de exposición de los granos a las condiciones del aire de secado es menor; y
- como el producto no se reseca, los daños mecánicos debidos al transporte posterior se reducen.

Dicho sistema de secado en flujos contrarios presenta ciertos problemas, entre ellos la carga adicional que deben soportar las paredes del silo debido a los equipos que mueven los granos.

2.3.3. Secadores intermitentes

Los secadores continuos ya descritos se pueden usar como secadores intermitentes. Para ello, basta que el producto, al salir del secador, vuelva a entrar a él, ya que estos secadores no retiran la humedad deseada del producto en una sola pasada y exigen que aquél pase más de una vez por el secador.

Hay secadores hechos para el secado intermitente, los cuales poseen en su parte superior una cámara de reposo para los granos. En estos secadores, los granos permanecen en la cámara de reposo cerca de 90% del tiempo total y solamente el 10% en contacto con el aire de secado. El propósito de la permanencia más prolongada en la cámara de reposo es que haya redistribución de humedad en los granos, lo que facilita el secado posterior. Al mismo tiempo, debido al breve periodo en que los granos quedan expuestos al aire de secado, la eliminación de humedad de los granos en cada pasada

por la cámara de secado es pequeña y exige un elevado número de pasadas. En la Figura 2. 38 aparece el esquema de un secador intermitente de flujos cruzados.

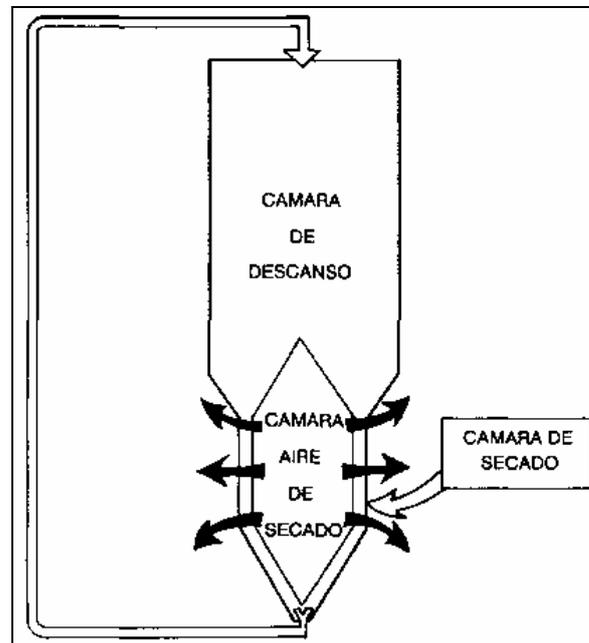


Figura 2. 38. Esquema de un secador intermitente de flujos cruzados.

El uso de secadores en canal es muy común en países de América Latina; muchas veces se les ocupa como secadores intermitentes y sencillamente se hace pasar el producto varias veces por el secador. Es imponente destacar que, en tales casos, la capacidad nominal del secador disminuye proporcionalmente con el número de pasadas del producto por el secador y es preciso tenerlo presente al dimensionar sistemas de secado / almacenamiento que emplean dicha técnica.

Ciertos productos agrícolas no soportan el secado continuo hasta alcanzar el contenido de humedad final que se busca, sin sufrir considerables daños físicos y fisiológicos. Es el caso de las semillas en general, del arroz y de los productos que se cosechan con humedad muy elevada. Estos productos se deben secar de manera intermitente.

Cuando el producto no está destinado a semilla, con excepción del arroz, la temperatura del aire de secado intermitente es la misma que se usa en los procesos continuos.

El secado intermitente no se realiza solamente en secadores adaptados para ello, pues los secadores de etapas múltiples también ocupan esa técnica. Estos últimos se componen de diversas cámaras de secado intercaladas con cámaras de reposo. De este modo, los granos entran al secador húmedos y salen secos, en una única pasada, con lo que el secador funciona en flujo continuo. El producto, en cambio, se somete a secado en cada cámara y el secado es, por tanto, intermitente.

El uso de equipos de etapas múltiples para efectuar el secado intermitente es ventajoso, en relación con el de recirculación del producto en secadores que no tienen zonas de descanso, porque en los primeros es posible usar diferentes temperaturas y flujos de aire en cada cámara de secado, con lo que se optimiza el uso del secador.

2.3.3.1. Secado combinado

El secado combinado es una técnica que consiste en utilizar un sistema de secado a altas temperaturas cuando el producto presenta un contenido de humedad más elevado, sobre 16-18%, y a partir de ese punto, completar el secado con un sistema de secado a bajas temperaturas.

La eficiencia térmica de secado de los secadores de altas temperaturas aumenta significativamente cuando ellos forman parte de sistemas de secado combinado. Los motivos principales para ese aumento de eficiencia son los siguientes:

- Los secadores funcionan con productos en una faja de humedad en que la evaporación de agua es más fácil; y
- Los enfriadores, en general no se usan, porque los granos normalmente deben llegar al sistema de secado a bajas temperaturas mientras están todavía calientes.

Muchas veces los enfriadores se convierten en zonas de secado, lo que aumenta la capacidad de los secadores a altas temperaturas.

Hace falta explorar mejor los sistemas de secado combinado, especialmente a nivel de granja.

2.3.3.2. Seca-aireación de granos

La seca-aireación de granos es un proceso en el cual el producto se seca, mediante un secador a altas temperaturas, hasta un contenido de humedad superior, en uno a tres puntos porcentuales, al contenido ideal para almacenarlo, sin someterse a enfriamiento mientras pasa por el secador. Luego, el producto pasa a un silo, donde permanece en reposo por un lapso de cuatro a seis horas y posteriormente se enfría, con el sistema de aireación del propio silo, que se debe proyectar para cumplir esa etapa en un período de 12 a 16 horas Figura 2. 39.

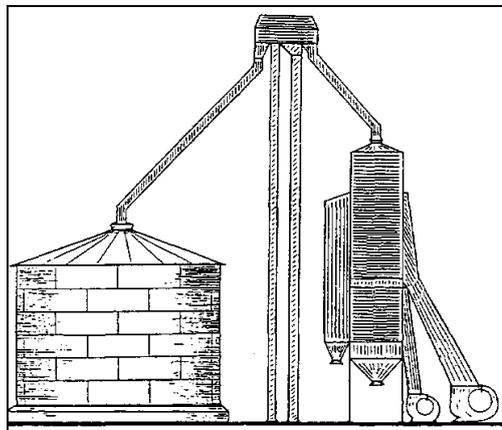


Figura 2. 39. Silo de seca -aireación.

El proceso de seca-aireación presenta tres ventajas en relación al proceso de secado a altas temperaturas, con enfriamiento en el propio secador: a) reducción del consumo de energía; b) producto final de mejor calidad; y c) aumento de la capacidad de secado del secador.

Durante el proceso de secado a altas temperaturas se desarrolla al interior de los granos una diferencia en el contenido de humedad y la parte interna permanece más húmeda que la parte superficial. Durante el período de reposo, en el proceso de seca-aireación, el contenido de humedad al interior del grano se empareja y permite que se retire entre uno y tres puntos porcentuales de humedad durante el periodo de enfriamiento. Cuando el enfriamiento se efectúa en el mismo secador, no se consigue retirar la misma cantidad de humedad, porque el enfriamiento se efectúa inmediatamente después del secado, en un lapso muy corto, sin aprovechar la energía almacenada en el grano en forma de calor sensible. Por ello el consumo de energía es menor cuando se emplea el proceso de seca – aireación.

Las tensiones internas que se desarrollan en el grano al final del proceso de secado a altas temperaturas y con enfriamiento rápido, se reducen al mínimo en el proceso de seca-aireación. Así, los granos están menos sujetos a fracturas y daños durante las operaciones posteriores al secado.

En el proceso de seca-aireación, el flujo de granos en el secador puede aumentar, ya que la cantidad de humedad que se ha de eliminar es menor. El aumento del flujo de granos permite utilizar temperaturas más elevadas en el aire de secado, en virtud del menor tiempo de residencia del producto en el secador. Con el aumento de temperatura, el aire gana más capacidad de secado, lo que permite aumentar aun más el flujo de granos. En esa forma, el secador pasa a tener mayor capacidad de secado y su eficiencia energética aumenta, debido a la elevación de la temperatura de secado. Se consiguen, generalmente, economías de 20 a 40% de energía y aumentos de la capacidad de secado entre 50 y 75%. El aumento real de la capacidad del secador y la economía de energía dependen del contenido de humedad inicial, de las condiciones climáticas del lugar y de la característica de la unidad almacenadora donde está instalado el sistema.

Enfriamiento. La operación de enfriamiento debe iniciarse cuatro a seis horas después de que la primera partida de granos entre en el silo. Incluso, una vez iniciado el enfriamiento, se puede seguir agregando producto hasta completar la capacidad del silo, porque el sentido del movimiento de aire es de abajo hacia arriba. En tal caso, el

ventilador escogido debe permitir que el producto quede en el silo por lo menos cuatro horas, sin someterlo a enfriamiento.

Si se trata de instalar sistemas de seca-aireación en que el secador es de baja capacidad de secado, generalmente se deben destinar dos silos al enfriamiento. Cada silo debe tener capacidad para recibir todo el grano secado en un día, de modo que, mientras un silo se carga, el producto del otro se puede estar enfriando o descargando. En aquellas unidades de almacenamiento que poseen un secador de gran capacidad, es preciso emplear más de dos silos para enfriar el producto, para que la potencia de los ventiladores no sea demasiado elevada.

Equipos empleados en el proceso de seca-aireación. En la instalación de un sistema de seca-aireación, es importante realizar un proyecto que incorpore todos los beneficios que el sistema puede proporcionar.

Los silos de enfriamiento deben tener capacidad compatible con la capacidad del secador. Cuando se usa un secador en un sistema de seca – aireación, su capacidad de secado aumenta en 50 a 75%. Hay que considerar también la posibilidad de ampliación futura del sistema, recordando que un silo sobredimensionado en un momento determinado no es problema, puesto que al final de la cosecha los silos de enfriamiento normalmente se transforman en silos de almacenamiento.

El ventilador se debe proyectar para que suministre la cantidad de aire necesaria para enfriar el producto durante el tiempo previsto. Si se tiene solo dos silos de enfriamiento, de modo que cada día el producto secado se destina a uno de ellos, es ideal que el ventilador entregue un flujo de aire suficiente para que el frente de enfriamiento se desplace dentro del silo, en la misma proporción en que este último se va cargando. De este modo, todo el producto permanecerá en reposo dentro del silo por un periodo de cuatro a seis horas. En tal situación, la cantidad mínima de aire recomendada es de 13 m³/min. por cada tonelada de capacidad horaria del secador empleado.

Si se ocupa la seca-aireación cuando la capacidad de secado del secador es elevada, el silo se repleta en corto tiempo. En tales condiciones, la cantidad de aire

recomendada para el enfriamiento es de 0,5 a 1 m³/min. por tonelada de capacidad del silo.

Además de entregar la cantidad ideal de aire, el ventilador debe hacer que el aire venza todas las resistencias que el sistema impone a su paso. Es importante considerar la resistencia que impone la masa de granos y el sistema de distribución de aire.

El sentido del movimiento del aire, en el enfriamiento del producto dentro del silo, debe ser de abajo hacia arriba, puesto que el enfriamiento normalmente comienza cuando el silo todavía no se termina de cargar. Con este procedimiento, la primera partida de granos que entra en el silo será la primera en enfriarse. Así, el aire caliente y húmedo que sale del frente de enfriamiento no entra en contacto con el producto ya enfriado, lo que podría provocar condensación de la humedad y un nuevo calentamiento de los granos.

El proceso de seca-aireación exige un sistema eficiente de transporte de granos, puesto que el producto debe pasar por correas transportadoras más veces que en el proceso de secado con enfriamiento en el propio secador. Las principales operaciones de transporte en un sistema de seca-aireación son tres: a) carga del secador con producto húmedo; b) traslado del producto caliente del secador al silo de enfriamiento; y c) traslado del producto enfriado al sistema de almacenamiento.

Los sensores de humedad que normalmente se emplean en las unidades de almacenamiento son los de método indirecto, es decir, que la determinación se hace correlacionando, generalmente, alguna propiedad eléctrica, con el contenido de humedad existente en el producto. Este tipo de aparato no entrega, generalmente, resultados satisfactorios en la determinación de la humedad del producto caliente que sale del secador. En vista de eso, es necesario establecer un factor de corrección para los valores que señala el sensor.

El secador de granos debe ofrecer dos opciones de uso: la operación tradicional y la operación en sistema de seca-aireación.

En la tradicional, el producto se seca y se enfría en el mismo secador. En la de seca-aireación, al producto se retira caliente del secador. Para esto, lo ideal es que el secador permita transformar la sección de enfriamiento en sección de secado; si ello no fuera posible, sencillamente se debe suspender la entrada de aire por la sección de enfriamiento.

2.4. Parámetros del secado de granos

2.4.1. Condiciones del aire ambiente

Las propiedades del aire que fluye alrededor del grano son un factor fundamental en la determinación de la tasa de remoción de humedad. La capacidad del aire de remover la humedad depende principalmente de su temperatura y humedad inicial, a mayor temperatura y menor contenido humedad, mayor capacidad de remoción de humedad.

Las relaciones entre la temperatura, humedad y otras propiedades termodinámicas están representadas en las cartas psicrométricas, como se muestra en la Figura 2. 40.

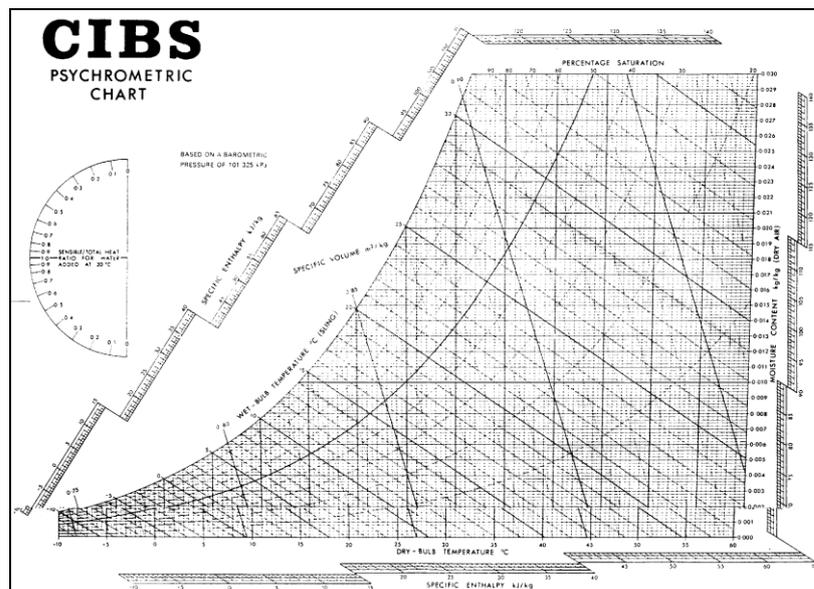


Figura 2. 40. Cartas Psicrométricas

Es importante apreciar la diferencia entre humedad absoluta y relativa. La humedad absoluta es el contenido de humedad del aire (masa de agua por unidad de masa de aire). La humedad relativa es la relación, expresada como porcentaje, entre el

contenido de humedad del aire a una temperatura específica y el su contenido máximo de humedad si estuviera saturado a esa temperatura.

Los cambios en las condiciones del aire cuando es calentado y luego pasado a través de un lecho de grano húmedo son mostrados en la Figura 2. 41.

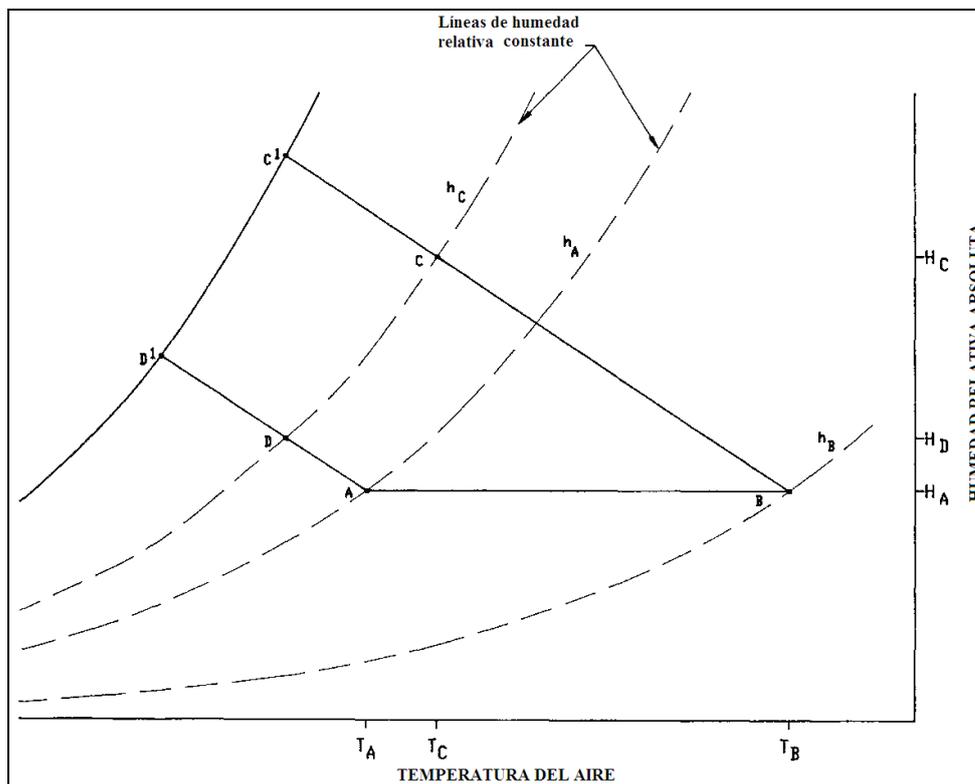


Figura 2. 41. Cambios de las condiciones del aire durante el secado.

El calentamiento del aire desde T_A a T_B está representado por la línea AB. Durante el calentamiento la humedad absoluta permanece constante en H_A , mientras que la humedad relativa cae de h_A a h_B . El aire absorbe humedad mientras se mueve a través del lecho. Bajo un hipotético secado adiabático el calor sensible del aire se convierte en calor latente y el cambio en las condiciones del aire está representado a lo largo de la línea de entalpía constante BC. El aire habrá incrementado humedad absoluta, H_c , y humedad relativa, h_c , pero habrá disminuido su temperatura, T_C . La absorción de humedad del aire estará dada por la diferencia entre las humedades absolutas entre C y B ($H_C - H_A$)

Si el aire frío fuera pasado a través del lecho, el proceso de secado estaría representado por la línea AD. Asumiendo que el aire en el punto D tuviera la misma humedad relativa, h_c , que el aire caliente en C, entonces la humedad absorbida sería $(HD - HA)$, considerablemente menor que la absorbida por el aire calentado $(HC - HA)$

La energía requerida para forzar el aire a través de un lecho de grano depende del flujo del aire, la profundidad del lecho y propiedades físicas como su superficie, factores de forma, distribución del tamaño de grano, contenido de humedad, cantidad y naturaleza de impurezas como piedras, hojas, entre otros. La relación entre el flujo de aire y la caída de presión generada a través del lecho para granos seleccionados se muestra en la Figura 2. 42 . La información se refiere a grano limpio y seco. Se utilizan factores de corrección de hasta 1.4 para grano muy húmedo y sucio¹⁸.

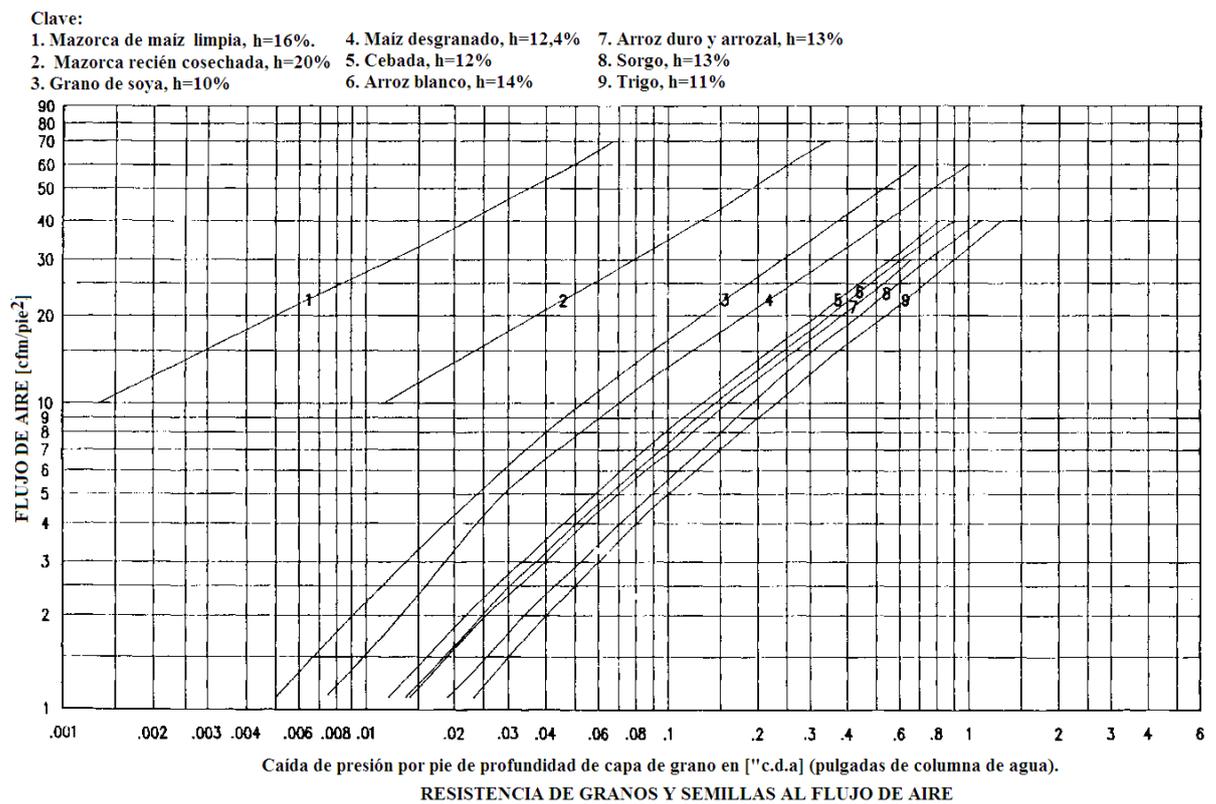


Figura 2. 42. Resistencia al flujo de aire de granos y semillas.

¹⁸ (Teter 1987).

2.4.2. Condiciones del grano

La operación de secado no debe ser considerada simplemente como la remoción de humedad, debido a que existen muchos factores de calidad que pueden ser afectados adversamente por una incorrecta selección de condiciones de secado y equipamiento. Las propiedades deseables de un grano de alta calidad incluyen:

- Contenido de humedad bajo y uniforme.
- Proporción mínima de granos rotos y dañados.
- Baja susceptibilidad al rompimiento posterior.
- Alta viabilidad.
- Bajo conteo de bacterias.
- Alto valor nutritivo.
- Aceptabilidad de apariencia por parte del consumidor y propiedades organolépticas.

2.4.2.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad del grano está usualmente medido en base húmeda, masa de agua por unidad de masa de grano húmedo, expresada como X(%) (wb). La medida alternativa se refiere a la medición en base seca (X%(db)), que es la masa de agua por unidad de masa de grano completamente seco. La conversión entre ambas escalas de medida se muestra en la Tabla 2. 6. Todos los contenidos están dados en base de peso húmedo, a menos que se diga lo contrario.

Tabla 2. 6. Equivalencias entre humedad en base húmeda (Hh) y humedad en base seca (Hs)

| Equivalencias entre humedad en base húmeda (Hh) y humedad en base seca (Hs) | | | | | |
|---|------|----|------|----|------|
| Hh | Hs | Hh | Hs | Hh | Hs |
| 7 | 7,5 | 20 | 25,0 | 33 | 49,3 |
| 8 | 8,7 | 21 | 26,6 | 34 | 51,5 |
| 9 | 9,9 | 22 | 28,2 | 35 | 53,8 |
| 10 | 11,1 | 23 | 29,9 | 36 | 56,2 |

| Equivalencias entre humedad en base húmeda (Hh) y humedad en base seca (Hs) (continuación) | | | | | |
|---|------|----|------|----|------|
| 11 | 11,4 | 24 | 31,6 | 37 | 58,7 |
| 12 | 13,6 | 25 | 33,3 | 38 | 61,3 |
| 13 | 14,9 | 26 | 35,1 | 39 | 63,9 |
| 14 | 16,3 | 27 | 37,0 | 40 | 66,7 |
| 15 | 17,6 | 28 | 38,9 | 41 | 69,5 |
| 16 | 19,0 | 29 | 40,8 | 42 | 72,4 |
| 17 | 20,5 | 30 | 42,9 | 43 | 75,4 |
| 18 | 21,9 | 31 | 44,9 | 44 | 78,6 |
| 19 | 23,5 | 32 | 47,1 | 45 | 81,8 |
| Referencia: Enciclopedia Terranova 1995. | | | | | |

La Tabla 2. 7 muestra la masa de agua perdida por el grano húmedo, durante el secado, para un rango de contenidos de humedad iniciales y finales dados.

Tabla 2. 7. Pérdida de humedad durante el secado.

| Pérdida de humedad durante el secado | | | | | | | | | |
|---|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Contenido de humedad inicial (%wb) | Contenido de humedad final (%wb) | | | | | | | | |
| | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 |
| | Pérdida de humedad (kg/tonelada) | | | | | | | | |
| 30 | 136 | 146 | 157 | 167 | 176 | 186 | 195 | 205 | 213 |
| 29 | 125 | 134 | 145 | 155 | 165 | 174 | 184 | 193 | 202 |
| 28 | 111 | 122 | 133 | 143 | 153 | 163 | 172 | 182 | 191 |
| 27 | 99 | 110 | 120 | 131 | 141 | 151 | 161 | 170 | 180 |
| 26 | 86 | 98 | 108 | 119 | 129 | 140 | 149 | 159 | 169 |
| 25 | 74 | 85 | 96 | 107 | 118 | 128 | 138 | 148 | 157 |
| 24 | 62 | 73 | 84 | 95 | 106 | 116 | 126 | 136 | 146 |
| 23 | 49 | 61 | 72 | 83 | 94 | 105 | 115 | 125 | 135 |
| 22 | 37 | 49 | 60 | 71 | 82 | 93 | 103 | 114 | 124 |
| 21 | 25 | 37 | 48 | 60 | 71 | 81 | 92 | 102 | 112 |
| 20 | 12 | 24 | 36 | 48 | 59 | 70 | 80 | 91 | 101 |
| 19 | | 12 | 24 | 36 | 47 | 58 | 69 | 80 | 90 |
| 18 | | | 12 | 24 | 35 | 47 | 57 | 68 | 79 |
| 17 | | | | 12 | 24 | 35 | 46 | 57 | 67 |
| 16 | | | | | 12 | 23 | 35 | 45 | 56 |
| 15 | | | | | | 12 | 23 | 34 | 45 |
| Referencia: Enciclopedia Terranova 1995. | | | | | | | | | |

Es esencial que el grano después del secado tenga un contenido de humedad apto para el almacenamiento. Este parámetro depende del tipo de grano, duración del almacenamiento y las condiciones disponibles. También es importante minimizar el rango de niveles en un lote de grano secado. Secciones de granos sub – secados pueden conducir al deterioro del lote.

2.4.2.2. Esfuerzo de rompimiento y granos rotos

Secar con aire caliente o la excesiva exposición al sol puede ocasionar la elevación de la temperatura interna del grano hasta que el endospermio se rompa. La extensión del esfuerzo de rompimiento está relacionada con la tasa de secado aunque el enfriamiento rápido del grano también puede contribuir a su desarrollo.

2.4.2.3. Valor nutricional

Los constituyentes del grano como proteínas, azúcares y almidones pueden ser afectados cuando es expuesto a temperaturas excesivas. El valor alimenticio de los granos puede ser disminuido si es secado de manera inadecuada.

2.4.2.4. Viabilidad del grano

Las semillas requieren de una alta proporción de granos individuales con propiedades de germinación. Esta propiedad está directamente vinculada a la temperatura alcanzada por los granos durante el secado¹⁹.

2.4.2.5. Crecimiento de bacterias

Muchos cambios en la calidad del grano están vinculados al crecimiento de bacterias y otros microorganismos. Su tasa de desarrollo depende del contenido de humedad, temperatura y el grado de daño físico del grano. Bajo ciertas condiciones el desarrollo de micotoxinas puede ser un peligro.

¹⁹ (Kreyger 1972).

2.4.2.6. Apariencia y propiedades organolépticas

El color y apariencia es un factor importante por cuanto es percibido por el comprador o consumidor. Por ejemplo, el color del arroz puede ser afectado cuando es secado en secadores con flujo directo o con secadores mal mantenidos.

2.4.2.7. Densidad volumétrica

La densidad volumétrica del grano es el peso por unidad de volumen. El contenido de humedad tiene un efecto apreciable en la densidad.

2.4.2.8. Calor latente de vaporización

Debe suministrarse energía en forma de calor para evaporar la humedad del grano. El calor latente de vaporización, L_h , para un grano depende de su contenido de humedad y temperatura y es mucho mayor que el calor latente de vaporización del agua. En la Tabla 2. 8 se muestran calores latentes de vaporización para maíz con contenido de humedad y temperatura seleccionados.²⁰

Tabla 2. 8. Calor Latente de Vaporización para el maíz.

| Calor Latente de Vaporización para el maíz | | | | | | |
|--|---------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|
| Temperatura (°C) | Calor Latente de Vaporización (KJ/Kg) | | | | | |
| | Agua libre | Contenido de humedad (%wb) | | | | |
| | | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| 25 | 2443 | 2605 | 2518 | 2483 | 2464 | 2453 |
| 30 | 2431 | 2593 | 2506 | 2471 | 2452 | 2441 |
| 35 | 2419 | 2580 | 2493 | 2458 | 2440 | 2429 |
| 40 | 2407 | 2567 | 2482 | 2447 | 2428 | 2417 |
| 45 | 2395 | 2555 | 2469 | 2434 | 2416 | 2405 |
| 50 | 2383 | 2542 | 2456 | 2422 | 2404 | 2393 |
| 55 | 2371 | 2529 | 2444 | 2410 | 2391 | 2381 |
| 60 | 2359 | 2516 | 2432 | 2398 | 2379 | 2369 |

Referencia: Enciclopedia Terranova 1995.

²⁰ Información para otros granos han sido reportados por Brooker et al. (1974)

2.4.3. Eficiencia del secado

La eficiencia de la operación de secado es un importante factor en la consecución y selección del sistema óptima para una tarea en particular. Existen tres grupos de factores que afectan la eficiencia del secado:

- Aquellos relacionados al ambiente, en particular las condiciones del aire ambiente.
- Aquellos factores que son específicos del grano.
- Aquellos específicos del diseño y operación del secador.

Existen muchas diferentes formas de expresar la eficiencia del secado, las más utilizadas están basadas en: utilización de calor sensible (SHUE) y de combustible.

2.4.3.1. Eficiencia de utilización de calor sensible (EUCS)

La eficiencia de utilización de calor sensible considera el calor sensible atribuible a las condiciones iniciales del aire ambiente y cualquier calor agregado mediante el sistema de calentamiento. Esta definida mediante la siguiente relación:

$$EUCS = SHUE = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor sensible total en el aire de secado}} \quad \text{Ecuación 2.3.}$$

2.4.3.2. Eficiencia de combustible

La eficiencia de combustible está basada solamente en el calor suministrado por el combustible

$$\text{Eficiencia de combustible} = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor suministrado por el combustible}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

4.

Se puede apreciar que la eficiencia de combustible podría ser significativamente diferente para la operación del mismo secador en lugares con condiciones ambientales diferentes. Con bajas temperaturas de secado, particularmente en climas secos, el calor suministrado por el combustible puede ser menor a la mitad del calor sensible total y su valor podría exceder 100%. Por lo tanto, esta eficiencia no es un buen parámetro para comparaciones directas del desempeño de un secador en lugares distintos.

2.4.3.3. Eficiencia de secado

La eficiencia de secado es la más apropiada para la evaluación de diseños de secadores o entre secadores debido a que mide el grado de utilización del calor sensible en el aire de secado. Esta definida como:

$$\text{Eficiencia de secado} = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor disponible para remoción de humedad}} \quad \text{Ecuación 2. 5.}$$

Evaluadas las eficiencias de combustible y de secado de muchos tipos de secadores utilizados con maíz, en un amplio rango de condiciones, se han obtenido las siguientes aproximaciones:

Tabla 2. 9. Eficiencia de distintos secadores

| Eficiencia de distintos secadores | | |
|--|-----------------------|------------------|
| Tipo de secador | Eficiencia (%) | |
| | De combustible | De secado |
| Flujo continuo | 38 | 51 |
| Lote (Batch) | 42 | 58 |
| Seca aireación | 61 | 78 |
| Doble etapa | 60 | 79 |
| Referencia: Foster 1973 | | |

2.4.4. Tiempo de secado

Las condiciones de secado para granos y situaciones específicas son muchas y variadas. El secado tomará lugar bajo cualquier condición donde el grano esté expuesto a un flujo de aire insaturado. Se pueden obtener condiciones de secado muy rápidas utilizando grandes volúmenes de aire a alta temperatura pero, si se lleva a la práctica, eso es más ineficiente en cuanto al uso de energía y es más probable el daño del grano por sobrecalentamiento y/o sobre-secado. Por otra parte, el secado lento, como en el secado al sol en un clima riguroso provee condiciones de respiración y deterioro del grano conduciendo a pérdidas cualitativas y cuantitativas y al crecimiento de bacterias.

2.5. Transferencia de calor en lecho fluido

Los procesos que involucran la transferencia de calor en el lecho de un fluido se encuentran presentes en las industrias: química, farmacéutica, bioquímica, polímeros y productos alimenticios.

El procesamiento en el lecho de un fluido ofrece importantes ventajas sobre otros métodos de secado de materiales particulados. La fluidización ofrece una fácil transportación del material, altas tasas de transferencia de calor y alta eficiencia térmica además de prevenir el sobrecalentamiento de partículas individuales.

Las propiedades de un producto dado son determinadas a partir de la información sobre la tasa de secado, es decir cómo cambian los contenidos evaporables con el tiempo en el lecho de un fluido discontinuo operando bajo condiciones controladas. Otras propiedades importantes son la velocidad de fluidización del gas, punto de fluidización (es decir, el contenido de humedad bajo el cual la fluidización sin agitación mecánica o vibración es posible), contenido de humedad estable y el coeficiente de transferencia de calor para superficies calientes sumergidas. Estas y otras variables son aplicadas en modelos computacionales del procesamiento en el lecho de un fluido que además permiten dimensionar sistemas industriales de secado.

El procesamiento a través del lecho de un fluido es aplicable para polvos, gránulos, aglomerados, tabletas con un promedio de tamaño de partícula entre 50 micras y 5 milímetros. Aunque polvos livianos o partículas grandes pueden requerir vibración para un exitoso secado en el lecho de un fluido.

A través de toda la industria pueden ser encontrados muchos procesos cuyo éxito depende del buen contacto entre un fluido y un sólido particulado. Algunos ejemplos incluyen el proceso catalítico del petróleo, el tratamiento de agua por intercambio de iones y la combustión de combustibles sólidos. En muchos procesos industriales la técnica tradicional del contacto entre sólido y fluido consiste en un sólido

depositado por una parrilla o enrejado y un fluido corriendo a través del sólido estacionario.

Así los sistemas llamados de lecho estáticos son simples, robustos y baratos, pero sufren de un relativamente pobre contacto exitoso, y además los procesos de los cuales forman parte no conseguirán su máxima eficiencia.

Las razones para el poco contacto exitoso en un lecho estático son entre otros la limitada área de contacto, la acción protectora de una partícula sobre otra y el acanalamiento del flujo en ciertas partes del lecho.

Cualquier esquema que pueda mejorar el éxito del contacto entre sólido y fluido es merecedor de ser investigado, y la técnica de fluidización es actualmente una de las más importantes.

Para ilustrar el proceso de fluidización consideremos un lecho de partículas sólidas sostenido en una bandeja perforada en un tubo vertical, en el cual puede fluir agua. A muy bajas velocidades el agua pasará entre las partículas a través de los espacios disponibles o de los intersticios en el lecho. El flujo no necesariamente estará distribuido en el lecho, pero esto dependerá de las propiedades del material (compactación o defectos de la distribución del flujo), un hecho que realza el problema de los sistemas de lecho estático.

El estilo de flujo preferencial a través de una porción del lecho causado por altas y bajas resistencias locales es llamado acanalamiento.

Las consecuencias son claras. Cuando la velocidad de flujo es incrementada las partículas pueden sufrir burbujeo, o una menor perturbación, un reacomodo del lecho a causa de la no uniformidad del flujo.

Cuando el flujo sigue siendo incrementado la fuerza ejercida por el agua en una partícula será suficiente para levantar la partícula del lecho y separarla de sus vecinas, esto representa el principio de la fluidización.

En éste estado de incipiente fluidización o fluidización estable hay un inmediato mejoramiento del contacto entre sólido y fluido, pues toda la superficie del sólido es revelada y está disponible a la acción del fluido.

En esta etapa, no existe movimiento relativo de las partículas o éste es pequeño, y este lecho de fluido estable puede ser imaginado como el lecho estático anterior expandido un poco para separar las partículas, pero permaneciendo por otra parte invariable. Como sea un mayor incremento del flujo comenzará un proceso de mezclado que puede efectivamente volverse muy violento, hasta que todo el lecho se asemeje a un líquido hirviendo.

Éste estado representa al verdadera ventaja de la fluidización, el mezclado da un muy buen contacto entre sólido y fluido y alguna transferencia inherente de masa, entonces la transferencia de calor a las superficies del sólido inmerso en el fluido es mejorada comparada a las tasas de transferencia de calor convencionales. Considerables progresos, por ejemplo en el tratamiento térmico de componentes han sido realizados mediante el empleo de la técnica del lecho fluidizado.

En este punto el proceso de fluidización es descrito como “fase densa”, y el lecho estará contenido dentro del tubo y tendrá una fácilmente reconocible superficie superior.

Como sea, mientras la velocidad de flujo de agua se mantenga incrementada las fuerzas de arrastre o empuje excederán las fuerzas gravitacionales y las partículas estarán levantadas fuera del lecho. Esta remoción se conoce como elutriación ²¹. Llevado al extremo, todo el sólido es desplazado y resulta en transporte hidráulico o fase “dispersa”.El mayor interés en la fluidización está por tanto en la fase densa.

²¹ **Elutriar.**- 1.- Purificar ,separar o remover mediante lavado. 2.-Desleir en agua una materia en polvo para separar la parte más leve de la mas pesada. 3.- Lavar o mezclar con agua una sustancia porfirizada(pulverizada sobre loza de pórfido) y separar por decantación las partes más ligeras o leves de las más pesadas

2.5.1. Imperfecciones de la fluidización

Cuando un líquido es un medio fluidizador, las partículas permanecerán separadas. Este modo de fluidización no es reflejado típicamente donde un gas es un medio. Aquí el gas puede pasar en cierto modo y de manera regular a través del lecho fluidizado y las partículas pueden estar agrupadas juntas en el típico modo agregado de fluidización. Este modo es menos deseable en la práctica y más difícil de tratar de forma teórica, pero es un modo típico y por tanto ni fácil ni barato de comparar.

Las dos mayores imperfecciones operacionales que son conocidas en el trabajo con un lecho fluidizado son el acanalamiento y burbujeo. El primero en esencia depende de las propiedades del sólido y el fluido, originado con el fluido estático como se discutió antes, y dependiendo de su severidad será remediado en alguna etapa posterior del proceso.

Los dos extremos son por un lado el re-acomodamiento del lecho de fluidización y por otra parte la fase dispersa. El burbujeo es en esencia una función del diseño del aparato, con las propiedades del sólido del fluido jugando un papel secundario. Es la condición en la que las burbujas del fluido se aglomeran para aproximarse al diámetro del lecho, los sólidos siendo empujados como un pistón y luego cayendo a través de la burbuja o causando su desintegración. El fenómeno es más común en la fluidización gaseosa; de hecho, es razonable decir que la mayoría de problemas son mucho más severos con un gas que con un líquido.

El lecho de un fluido está caracterizado por el movimiento de partículas sólidas, conseguido por una corriente de un gas pasando a través de las capas del producto. La velocidad del gas es seleccionada para mantener el producto en suspensión; además de transportarlo neumáticamente. La capa en movimiento se comporta como un fluido, asumiendo un estado casi hidráulico. Alimentar el producto de forma continua a un punto al final del lecho resulta un sobre-flujo consistente en el punto más bajo del lecho.

En toda clase de unidades de lecho de un fluido, el gas ingresa a través de una placa de distribución y pasa a través de la capa del producto a contra corriente. Además,

manteniendo el producto fluidizado, el gas es un medio para la transferencia de calor y masa de alta eficiencia.

Además de la energía proveniente del gas, una cantidad significativa de calor puede ser aplicada o removida utilizando intercambiadores de calor inmersos en el lecho, lo cual desemboca en la consecución de altas eficiencias. Todas las partículas están moviéndose en forma constante proporcionando extenso contacto con las superficies de los intercambiadores de calor.

La alta eficiencia térmica de un equipo de lecho de fluido se debe al hecho de que la temperatura del gas de escape está generalmente por debajo de la temperatura máxima del producto. Como una consecuencia de esto, el secado y enfriamiento pueden ser combinados en un solo proceso.

El modo particulado de la fluidización es el más fácil de tratar en forma teórica a causa de su naturaleza consistente. Esto es reflejado en su cuantificación a la fecha y es conveniente tratar la fluidización agregativa aplicando factores de aproximación empíricos (los cuales pueden ser del orden de $\pm 25\%$) a la teoría de partículas. Una significativa cantidad de trabajo es practicada en otras aproximaciones.

2.5.2. Variables del proceso de fluidización

Cualquier teoría considerará las propiedades del lecho y sus constituyentes y se encontrarán los siguientes parámetros:

Tabla 2. 10. Variables del proceso de fluidización.

| Variables del proceso de fluidización | |
|--|--|
| Símbolo | Definición |
| ϵ | Vacuedad del lecho, la proporción del lecho operacional ocupado por el fluido antes que por las partículas del sólido. Expresado como una fracción o porcentaje y variando con el estado de la operación. |
| U | Velocidad superficial del fluido, la velocidad que tendría el fluido a través de un tubo vacío. Esta definición elimina el ancho rango de velocidades locales en un lecho real. |
| U_o, U_t | Mínima y máxima velocidad (superficial) en la fluidización del lecho. La primera es a principio de la fluidización y la segunda en el punto de elutriación, siendo la velocidad terminal de la partícula en el fluido. |
| D | Diámetro promedio de la partícula. El diámetro de la partícula varía en un lecho real. |
| H | Altura operacional del lecho, siendo el mínimo la altura del lecho estático original y el máximo en el punto de elutriación. |
| ρ_f, ρ_s | Densidad del fluido y del sólido. |
| μ | Viscosidad absoluta del fluido. |
| G | Aceleración de la gravedad |
| Δp | Caída de presión a través del lecho en cualquier escenario operacional. |
| Referencia: Manual de Operación Unidad de Transferencia de Calor en Lecho Fluido | |

2.5.2.1. Vacuedad del lecho (ϵ)

Se define como vacuedad del lecho a la proporción del lecho operacional ocupado por el fluido antes que por las partículas del sólido. Expresado como una fracción o porcentaje y variando con el estado de la operación.

2.5.2.2. Velocidad superficial del fluido (U_o, U_t)

Por la igualación de la caída de presión a través de un lecho compuesto (esencialmente un sucesión de canales estáticos) a un lecho fluidizado es deducida una expresión para la velocidad superficial del fluido al inicio de la fluidización:

$$u_o = \frac{C_o \cdot g \cdot d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot (1 - \varepsilon_o)}{\mu}$$

Ecuación 2. 6

Donde C_o es una constante y ε_o es la vacuedad inicial. La máxima velocidad es, como se ha definido, la velocidad terminal y está dada por :

$$u_t = \frac{C_t \cdot g \cdot d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\mu}$$

Ecuación 2. 7.

Donde C_t es una constante. El valor de U_t comparado con U_o es dependiente de muchos factores de proceso y la razón U_t/U_o es muy amplia. Para muchos sistemas esta razón se encuentra entre 10 y 100.

Para velocidades dentro de los valores limitados $U_o + U_t$, es conveniente expresar la velocidad en términos de uno de los límites y un método común invoca la vacuedad:

$$\frac{U}{U_t} = \varepsilon^n$$

Ecuación 2. 8.

Donde n es una función del Número de Reynolds, como en la Tabla 2. 11.

Tabla 2. 11. Número de Reynolds.

| Número de Reynolds. | |
|--|--|
| Re | N |
| < 0.2 | 4.65 |
| 0.2-1.0 | $4.35 \cdot \text{Re}^{-0.03}$ (Rango 4.57 – 4.35) |
| 1-500 | $4.45 \cdot \text{Re}^{-0.1}$ (Rango 4.45 – 2.39) |
| >500 | 2.39 |
| Referencia: Manual de Operación Unidad de Transferencia de Calor en Lecho Fluido | |

2.5.2.3. Diámetro promedio de la partícula (d)

Es el valor medio tomado de una muestra significativa de partículas. El diámetro de la partícula varía en un lecho real.

2.5.2.4. Viscosidad absoluta del fluido (μ)

Viscosidad es la propiedad de un fluido de ofrecer resistencia al movimiento relativo de sus moléculas. Esta resistencia obedece a dos fenómenos: la cohesión molecular y la transferencia molecular de una capa a otra, con lo cual se establece una fuerza tangencial o esfuerzo cortante. En los líquidos la cohesión es predominante y disminuye al aumentar la temperatura. Por otro lado, la cohesión en los gases es muy débil; en ellos la actividad molecular se incrementa al aumentar la temperatura y por ende la viscosidad también se incrementa al aumentarse la transferencia molecular.

2.5.2.5. Caída de presión a través del lecho (Δp)

En estado denso de fluidización, C, la caída de presión es la cabeza de presión estática del fluido.

$$\Delta P = h(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f)$$

Ecuación 2. 9

Asumiendo que el volumen total de partículas de sólido permanece substancialmente constante, entonces h y ε están directamente relacionados y además un incremento en uno es compensado por un decremento en el otro. Además ΔP permanece constante. Los efectos de la fricción de la pared pueden ser considerados, pero generalmente son pequeños comparados con la contribución de la cabeza estática a ΔP . Para un gas como medio de fluidización la $\rho_s \gg \rho_f$ y la expresión puede simplificarse a la forma:

$$\Delta P = h \cdot \rho_s \cdot (1 - \varepsilon) \quad \text{Ecuación 2. 10}$$

Muy aproximadamente las vacuiedades están alrededor del 30 y 40% para lechos compuestos y 70 a 80% para lechos fluidizados en fase densa.

2.5.3. Fases de la fluidización

Típicamente medios líquidos llevan a la fluidización particulada y medios gaseosos a la fluidización agregativa pero estas no son exclusivas y la modalidad de fluidización realmente depende de muchos factores en cualquier sistema. Referencias al número de Froude dan una indicación de la probable modalidad de fluidización pero existe un considerable traslape. Además, donde el número de Froude está dado por:

$$Fr = \frac{U^2}{d \cdot g} \quad \text{Ecuación 2. 11}$$

entonces para $Fr < 1.0$, la fluidización particulada puede ser esperada y para $Fr > 1.0$ se desarrollará fluidización agregativa. Debe ser repetido por la existencia de ese insignificante traslape.

PROCESO DE FLUIDIZACIÓN

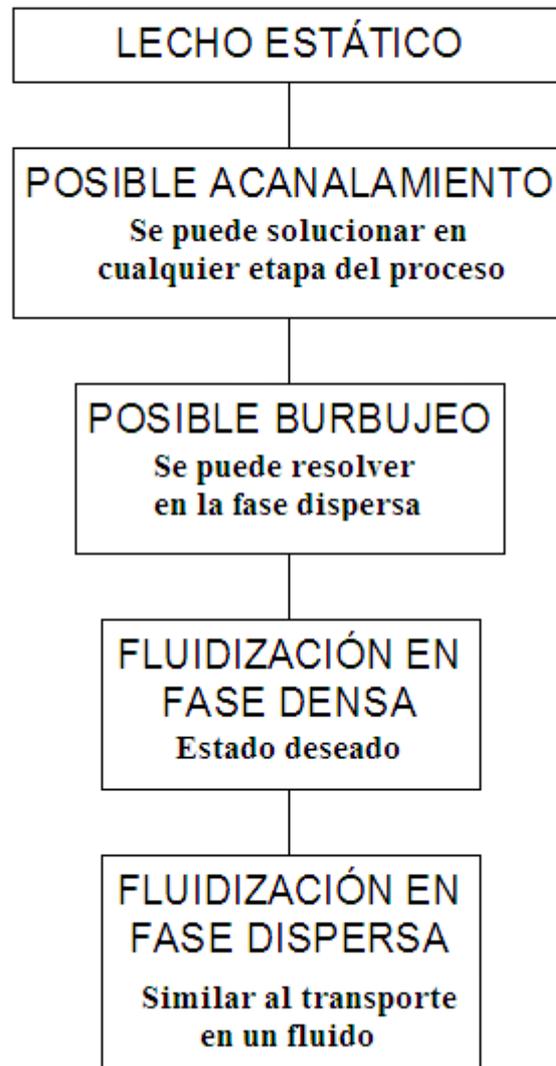


Figura 2. 43. Fases del proceso de fluidización.

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA

3.1. Parámetros de diseño

La elección de un apropiado sistema de secado es una decisión clave en el diseño de un proyecto. Es recomendable considerar antes una serie de factores técnicos, económicos y sociales que se hallan interrelacionados. Éstos pueden incluir:

- Las actuales prácticas de secado en una localidad (si las hubiera)

El diseñador debe preguntarse si el proyecto compromete simplemente la actualización de las técnicas tradicionales o se requiere de nuevas tecnologías y, tal vez, de nuevas materias primas. El conocimiento previo de la población acerca de las técnicas de secado puede tener un efecto positivo o negativo en la decisión que se tome. Puede ser que al estar usando las técnicas tradicionales teman arriesgarse al cambio, o por otro lado, que sean capaces de evaluar el potencial de los cambios propuestos.

- El volumen de material que debe ser secado en un día

Este aspecto se debe considerar para estimar el tamaño y la cantidad de secadoras requeridas.

- Las condiciones climáticas

Si se pretende introducir secadoras solares, resulta imprescindible conocer el clima local. Esa información debe ser obtenida de los registros o de la observación directa. Estos datos permitirán tener una opinión objetiva acerca de la factibilidad de utilizar secadoras solares. Véase Tabla 3. 7.

- Las características del material que va a secarse

Este aspecto considera si el producto ser secado al sol o ello afectará negativamente su calidad, determinará si el material está sujeto a daño producido por el calor, como en el caso de las semillas que deben sembrarse. Se aconseja solicitar asesoría técnica especializada acerca del tratamiento preliminar que debe darse al alimento. Éste puede incluir el lavado, la desinfección, el blanqueado, el cortado, entre otros. También se debe recabar información acerca de las temperaturas más recomendables para el secado. Las características del producto y el clima local determinarán el tipo de envase que deberá usarse.

- La disponibilidad de materia prima, materiales de construcción y habilidades técnicas

Esto es de vital importancia, especialmente cuando se piensa usar secadoras a gran escala.

- La disponibilidad de combustibles y los costos involucrados

Un factor importante es el tipo de combustible a utilizarse y su disponibilidad en la localidad, se discutirá más detenidamente este tema en la sección 3.2.4. Por ejemplo, si se trata de madera, deben analizarse los efectos de su utilización sobre el ambiente y cómo afectará la elección de combustibles la viabilidad económica del proyecto?

- El valor agregado

Todos los sistemas de secado mejorados involucran una inversión de capital. Allí donde los productos van a usarse en el hogar o para asegurar la disponibilidad de alimentos, el gasto no debe percibirse sólo en términos monetarios sino como una mejora en la calidad de vida de las personas que usan estas tecnologías. En aquellos casos donde se involucre la generación de ingresos y la venta del producto, el valor agregado cobrará mayor significado. El valor agregado debe cubrir los costos del equipo

por un periodo determinado después de que se han previsto los costos fijos, tales como la mano de obra, el combustible y las ganancias acordadas.

- Diversidad de productos

Cabe resaltar que la mayoría de secadores son de hecho utilizados para secar diversos productos para aprovechar el uso de la secadora durante todo el año.

- Comercialización y demanda de calidad

La venta de muchos productos alimenticios puede fracasar debido a los problemas de comercialización. Debe tomarse en cuenta la disponibilidad de un mercado, dentro de ello si el secador se encuentra en la localidad o en áreas distantes, si la calidad del producto se verá afectada por las condiciones de transportación, si las condiciones de calidad y envasado se ajustan a la demanda y también el nivel de competencia existente.

Se deben tomar se en cuenta diversos factores sociales y culturales, incluyendo la división del trabajo, la disponibilidad de tiempo y el control del equipo.

Cuando se hayan considerado todos estos aspectos resultará claro si es que las técnicas de secado existentes resultan adecuadas o requieren de mejoras. Tomando como base las condiciones climáticas, ¿el secado solar representa o no una opción adecuada?, ¿resulta necesario utilizar secadoras artificiales?. Tomando como base el monto del valor agregado, puede resultar necesario incorporar equipos más sofisticados como las secadoras artificiales de aire forzado. Se requiere de especial atención en algunas áreas como, por ejemplo, la calidad de la materia prima o la disponibilidad de un mercado.

En nuestro caso, como se puede observar en las secciones subsiguientes, todos estos factores han sido considerados hasta llegar al diseño de una alternativa óptima para el proceso de secado de maíz.

3.1.1. Descripción general

En el Nuevo Mundo el maíz es considerado como el principal cereal domesticado y fue base alimenticia de las civilizaciones Maya, Azteca e Inca. Las teorías genéticas sobre el origen del maíz son muy diversas, pero parece bastante claro que se originó como planta cultivada en algún lugar de América Central. Desde su centro de origen el maíz se difundió por casi toda América y, tras el descubrimiento de ésta, por el resto del mundo; es actualmente uno de los cereales más cultivados. Las principales zonas de cultivo son Estados Unidos, América Central, Argentina, Brasil, Europa Suroriental, China, África del Sur e Indonesia.

Tabla 3. 1. Descripción general del maíz.

| Descripción general del maíz. | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Reino: | Vegetal |
| Clase: | Angiospermae |
| Subclase: | Monocotyledoneae |
| Orden: | Glumiflorae |
| Familia: | Graminaceae |
| Género: | Zea |
| Especie: | Mays L. |
| Nombre científico: | Zea Mays L. |
| Nombres comunes: | Choclo, elote. |
| Referencia: | Enciclopedia Agropecuaria Terranova |

3.1.2. Estructura del grano

Muchos alimentos tienen una capa exterior de protección que impide que su interior se seque por completo. No hay mucho que se pueda hacer en el caso de los cereales y legumbres, que normalmente se secan enteros, pero el nivel de secado de otros productos puede facilitarse si el alimento se pela o corta.

Los granos de maíz se desarrollan mediante la acumulación de los productos de la fotosíntesis, la absorción a través de las raíces y el metabolismo de la planta de maíz en la inflorescencia femenina denominada espiga. Esta estructura puede contener de 300 a 1000 granos según el número de hileras y el diámetro y longitud de la mazorca. El peso del grano puede variar mucho, de aproximadamente 19 a 30 g por cada 100 granos.

Durante la recolección, las panojas de maíz son arrancadas manual o mecánicamente de la planta. Se pelan las brácteas que envuelven la mazorca y luego se separan los granos a mano o, más a menudo, mecánicamente.

El grano de maíz se denomina en botánica cariósipide o cariopsis; cada grano contiene el revestimiento de la semilla, o cubierta seminal, y la semilla, como se ve en la Figura 3. 1, donde se muestran también las cuatro estructuras físicas fundamentales del grano: el pericarpio, cáscara, o salvado; el endospermo; el germen o embrión; y la piloriza (tejido inerte en que se unen el grano y el carozo).

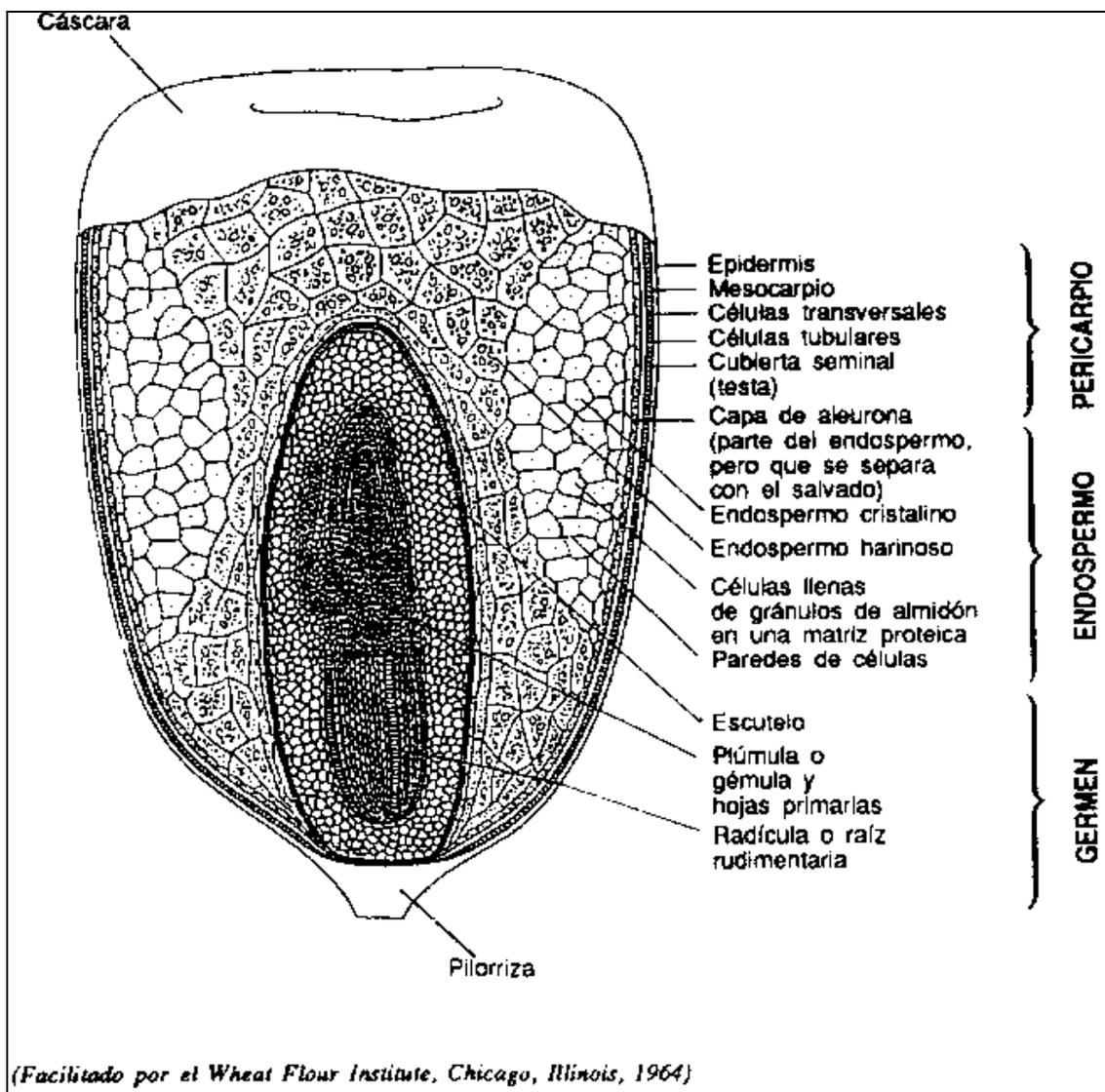


Figura 3. 1. Estructura esquemática del grano de maíz.

Tabla 3. 2. Composición química del maíz.

| Composición Química del maíz(100 g) | | | |
|---|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| | Amarillo trillado | Blanco Centeno | Blanco trillado |
| Agua | 12,00 | 15,20 | 25,00 |
| Proteínas | 8,40 | 7,60 | 8,70 |
| Grasas | 1,20 | 3,80 | 0,90 |
| Carbohidratos | 77,30 | 71,20 | 74,60 |
| Fibra | 0,50 | 1,90 | 0,50 |
| Cenizas | 0,60 | 1,30 | 0,30 |
| Otros componentes (mg) | | | |
| Calcio | 5,00 | 7,00 | 4,00 |
| Fósforo | 99,00 | 310,00 | 71,00 |
| Hierro | 1,20 | 2,10 | 1,10 |
| Tiamina | 0,18 | 0,32 | 0,20 |
| Riboflavina | 0,08 | 0,09 | 0,03 |
| Niacina | 0,60 | 2,30 | 1,10 |
| Ácido ascórbico | - | 1 | - |
| Vitamina A | 300 UI | - | - |
| Calorías | 361 | 328 | 348 |
| Referencia: Enciclopedia Agropecuaria Terranova (1995). | | | |

3.1.3. Aplicaciones

El maíz tiene tres aplicaciones posibles: alimento, forraje y materia prima para la industria. Como alimento, se puede utilizar todo el grano, maduro o no, o bien se puede elaborar con técnicas de molienda en seco para obtener un número relativamente amplio de productos intermedios, como por ejemplo sémola de partículas de diferentes tamaños, sémola en escamas, harina y harina fina, que a su vez tienen un gran número de aplicaciones en una amplia variedad de alimentos; se debe notar que el maíz cultivado en la agricultura de subsistencia continúa siendo utilizado como cultivo alimentario básico. En lo que respecta a su aplicación como forraje, en los países desarrollados más del 60 por ciento de la producción se emplea para elaborar piensos (porción de alimento seco que se da al ganado) compuestos para aves de corral, cerdos y rumiantes; en los últimos años, aun en los países en desarrollo en los que el maíz es un alimento fundamental, se utiliza un porcentaje más elevado de la producción como ingrediente para la fabricación de piensos. Desde hace relativamente poco, el maíz con elevada humedad ha despertado gran interés como alimento para animales, debido a su

menor costo y a su capacidad de mejorar la eficiencia de la transformación de los alimentos. Los subproductos de la molienda en seco son el germen y la cubierta seminal, el primero se utiliza para obtener aceite comestible de elevada calidad mientras que la cubierta seminal, o pericarpio, se emplea fundamentalmente como alimento, aunque en los últimos años ha despertado interés como fuente de fibra dietética

El aumento de los precios del petróleo ha impulsado la intensificación de las investigaciones sobre la fermentación del maíz para producir alcohol combustible, el cual tiene un uso muy difundido en algunas partes de los Estados Unidos. Con maíz fermentado se elaboran también algunas bebidas alcohólicas.

Por último, también tienen importancia las aplicaciones de los residuos de la planta de maíz, que se utilizan, entre otras cosas, como alimento para animales y como base para extraer diversos productos químicos de las panojas, como por ejemplo, furfural y xilosa. Estos residuos también tienen importancia como elementos para mejorar los suelos.

3.1.4. Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del grano

Para diseñar máquinas y procesos que involucren operaciones de almacenamiento de maíz se deben considerar las características físicas, mecánicas y térmicas del producto como: forma, tamaño, porosidad, peso específico, volumen, densidad, área superficial, esfericidad, pérdida de carga, calor específico.

- Forma y tamaño: Un criterio elemental es la comparación del grano con formas geométricas, en este caso la esfera, lo cual constituye una ayuda para determinar el volumen y la densidad.
- Área superficial: es una característica muy útil en los procesos de transferencia de calor (deshidratación, preenfriamiento) y en la evaluación de la calidad física el grano. Se retira la cáscara o epidermis en forma de tiras, las cuales se dibujan en un papel, y posteriormente por planimetría se determina el área total del producto.

- Volumen: se mide colocando el producto en una probeta graduada con agua; el líquido desplazado por el grano equivale a su volumen.
- Peso unitario: es el peso promedio del producto medido en una balanza de precisión.²²
- Densidad: es la relación entre la masa del producto y el volumen del producto, se expresa en [gr/cm³]. Puede ser aparente o real. Densidad aparente es la relación entre el peso total y el volumen total de los productos, incluidos los espacios vacíos que quedan entre ellos cuando están almacenados. La densidad real es la relación entre la masa y el volumen real ocupado por el producto, excluidos los espacios vacíos.

$$Densidad = \frac{\textit{masa del producto}}{\textit{volumen del producto}} \quad [g/cm^3] \quad \textbf{Ecuación 3. 1}$$

Porosidad: indica el porcentaje de espacios vacíos que dejan los productos entre sí cuando están almacenados a granel o empacados. La porosidad guarda relación con la densidad aparente y la densidad real.

$$Porosidad = 1 - \left[\frac{\textit{densidad aparente}}{\textit{densidad real}} \right] \times 100[\%] \quad \textbf{Ecuación 3. 2}$$

Pérdida de carga: es la resistencia que opone el producto al paso del flujo de aire cuando es secado o deshidratado utilizando la corriente de aire de un ventilador. Esta propiedad depende de la velocidad, viscosidad y densidad del aire; y, de la porosidad, tamaño, forma, área superficial y contenido de humedad del grano. Para el caso de granos y semillas, se han elaborado curvas que permiten calcular la pérdida de presión producida por el grano, factor importante que debe considerarse en la selección de un sistema de secado.

Calor específico: Cuando se someten los productos agrícolas a un proceso térmico, absorben o ceden calor como lo hace cualquier otro cuerpo. Esta propiedad

²² El peso promedio resulta de realizar 10 mediciones de granos distintos tomados como muestra.

permite cuantificar la cantidad de energía que un gramo de producto cede o suministra a un gramo de fluido (agua o aire) para elevar su temperatura en un grado centígrado.

En la Tabla 3. 3 se puede observar las características del maíz y del proceso de secado.

Tabla 3. 3. Principales Características del maíz y del proceso de secado.

| Principales características del maíz y del proceso de secado | | |
|---|-------------|-------------------|
| Característica | | Unidades |
| Diámetro mayor | 12,59 | Mm |
| Diámetro medio | 8,01 | |
| Diámetro menor | 4,34 | |
| Contenido de humedad recomendado para almacenamiento | 13,0 - 14,0 | % |
| Densidad aparente | 726,0 | Kg/m ³ |
| Densidad real | 1232,0 | |
| Porosidad | 31,2 | % |
| Temperatura máxima del aire para secado (semilla) | 40 | ° C |
| Temperatura máxima del aire para secado (uso comercial) | 55 | |
| Temperatura máxima del aire para secado (alimentación animal) | 80 | |
| Tiempo para revolver durante proceso de secado | 2 | H |
| Referencia: Rossi y Roa (1980) | | |

El significado práctico de contenido de humedad de equilibrio indica que bajo ninguna circunstancia es posible secar a un contenido de humedad menor que el EMC asociado con la temperatura y humedad del aire de secado.

Tabla 3. 4. Contenido de Humedad de Equilibrio del maíz para diferentes temperaturas.

| Contenido de humedad de equilibrio del maíz (EMC) | | | | | | | | | | |
|--|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Temperatura | Humedad relativa (%) | | | | | | | | | |
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| °C | Contenido de humedad de equilibrio (%wb) * | | | | | | | | | |
| 10 | 6,6 | 8,0 | 9,3 | 10,8 | 12,2 | 13,8 | 15,2 | 17,5 | 21,8 | - |
| 15 | 7,5 | 7,8 | 9,0 | 10,3 | 11,3 | 12,4 | 13,9 | 16,3 | 19,8 | - |
| 25 | 5,1 | 7,0 | 8,3 | 9,8 | 11,2 | 12,9 | 14,0 | 15,6 | 19,6 | 23,8 |
| 30 | 4,4 | 7,4 | 8,2 | 9,0 | 10,2 | 11,4 | 12,9 | 14,8 | 17,4 | - |
| Referencia: Enciclopedia Agropecuaria Terranova (1995) * Humedad relativa base húmeda. | | | | | | | | | | |

Al observar los datos de la Tabla 3. 4 se encontró que no existen referencias para las condiciones del aire de secado: 80 °C y 1,8% de humedad relativa. Realizamos entonces un análisis de regresión lineal para determinar el EMC en estas condiciones.

Tabla 3. 5. Análisis de regresión lineal del EMC

| Análisis de regresión lineal del EMC | | | | | | |
|---|-----------------|----------------|----------------------|-----------------|---|---|
| X | Y | X.Y | X² | Y | (Y-\hat{Y})² | (Y-\bar{Y})² |
| T (C) | % | | | | | |
| 10 | 6,6 | 66 | 100 | 7,26 | 0,436 | 0,49 |
| 15 | 7,5 | 112,5 | 225 | 6,58 | 0,846 | 2,56 |
| 25 | 5,1 | 127,5 | 625 | 5,22 | 0,014 | 0,64 |
| 30 | 4,4 | 132 | 900 | 4,54 | 0,02 | 2,25 |
| $\Sigma = 80$ | $\Sigma = 23,6$ | $\Sigma = 438$ | $\Sigma = 1850$ | $\Sigma = 23,6$ | $\Sigma = 1,316$ | $\Sigma = 5,94$ |
| Referencia: Autores. | | | | | | |

La ecuación de la recta de mejor ajuste según el método de los mínimos cuadrados es de la forma:

$$Y = a \pm b.X \quad \text{Ecuación 3. 3.}$$

Cuyos coeficientes se encuentran resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\sum Y = n.a \pm b.\sum X \quad \text{Ecuación 3. 4}$$

$$\sum X.Y = a\sum X \pm b.\sum X^2 \quad \text{Ecuación 3. 5}$$

Donde:

a → Intersección con el eje Y

b → Pendiente de la recta

n → Numero de observaciones

Así, reemplazando valores se obtuvieron:

$$23,6 = 4.a + 80.b$$

$$438 = 80.a + 1850.b$$

$$a = 8,62$$

$$b = -0,1360$$

Reemplazando los coeficientes en la ecuación de regresión obtenemos:

$$Y = 8,62 - 0,1360.X$$

Para conocer la utilidad de este modelo es necesario calcular el coeficiente de determinación mediante la ecuación:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2} \quad \text{Ecuación 3. 6}$$

$$r^2 = 1 - \frac{1,316}{5,94}$$

$$r^2 = 0,7786$$

Lo que indica que el modelo matemático encontrado explica el 77,86% de las variaciones en la variable dependiente mediante cambios en la variable independiente, lo que para nosotros es inaceptable. Por este motivo, mediante la utilización del programa Excel, se procedió a buscar un modelo matemático que se ajuste de mejor manera a los datos disponibles.

Comparando los valores del coeficiente de determinación de varias líneas de tendencia, se encontró que el modelo que mejor se ajusta a la relación entre la temperatura y el contenido de humedad de equilibrio a una humedad relativa determinada es una curva exponencial que para este caso es:

$$Y = 9,317^{-0,0239X}$$

$$EMC = 9,317^{-0,0239T}$$

$$r^2 = 0,8157$$

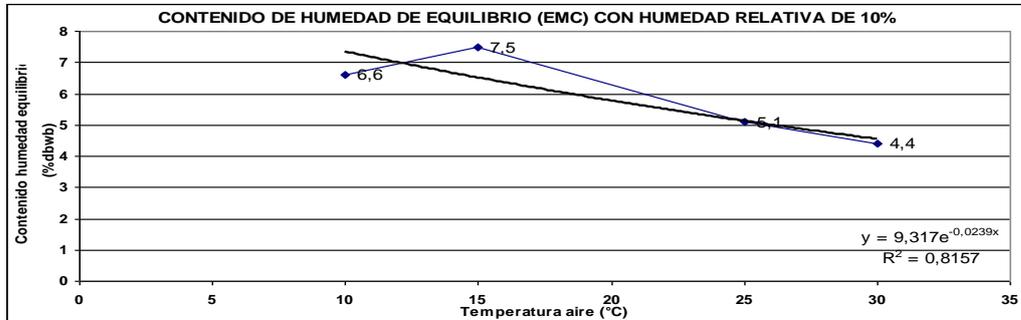


Figura 3. 2. Contenido de Humedad de Equilibrio (EMC) con Humedad Relativa de 10%

De acuerdo al análisis expuesto, se reemplazaron las condiciones del aire de secado en la ecuación obtenida y se obtuvo lo siguiente:

Tabla 3. 6. EMC a 80 C, HR=10%

| EMC a 80 C, HR=10% | |
|---|----------------|
| $Y = 9,317^{-0,0239 * X}$ | |
| $r^2 = 0,8157$ | |
| X | Y |
| T (C) | EMC (%) |
| 4,80 | 8,3072 |
| 80 | 1,3769 |
| Referencia: Autores. | |

Debemos tener mucho cuidado al interpretar estos resultados, primero los valores se refieren al EMC con un aire de secado con humedad relativa del 10%, además como se expresó en el segundo capítulo mientras se avanza en el proceso de secado se dificulta progresivamente la remoción de humedad y disminuye la tasa de secado. Por otra parte, la extrapolación de valores fuera del rango de datos no es una práctica matemáticamente segura, sin embargo las tendencias del modelo exponencial se mantienen en todas las curvas de la familia de graficas que se pueden obtener a partir de la Tabla 3. 6 tal como se muestra en la Figura 3. 3. Este breve análisis nos indica que

el valor del EMC de 1,38% es suficientemente bajo como para concluir que con el aire de secado es factible reducir el contenido de humedad del grano hasta el 13% deseado para su almacenamiento.

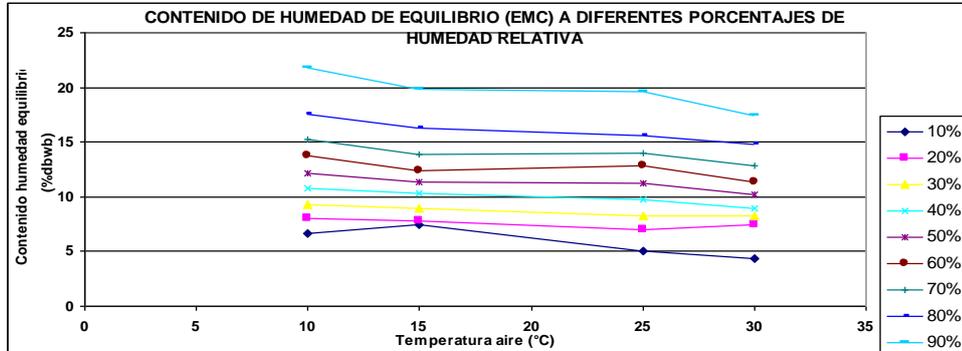


Figura 3. 3. Familia de curvas del EMC a diferentes humedades relativas.

Como se ha citado con anterioridad, las condiciones ambientales del sitio donde va a funcionar la secadora constituyen variables de gran importancia. En este contexto es imprescindible conocer los datos más adversos que se presentan en el sector para que el diseño de los componentes del sistema satisfaga los requerimientos de operación durante cualquier época del año y a cualquier hora del día.

Tabla 3. 7. Condiciones ambientales en San Antonio de Pichincha.

| Condiciones ambientales en San Antonio de Pichincha | | |
|--|------------------|-----|
| Característica | Unidades | |
| Latitud | 0 ° 25 ' 19 " S | |
| Longitud | 78 ° 26 ' 13 " W | |
| Elevación sobre el nivel del mar. | 2430 | m |
| Temperatura máxima absoluta anual | 28,0 | ° |
| Temperatura mínima absoluta anual | 4,8 | |
| Temperatura máxima promedio anual | 23,1 | |
| Temperatura mínima promedio anual | 10,2 | |
| Temperatura promedio mensual | 16,4 | |
| Humedad relativa máxima anual | 100,00 | % |
| Humedad relativa mínima anual | 32,00 | |
| Humedad relativa promedio anual | 79,00 | |
| Velocidad de viento promedio anual | 14,00 NW | m/s |
| Referencia: INAMHI. Anuario Meteorológico 1990. Estación M115. San Antonio de Pichincha. | | |

Los datos referidos en la Tabla 3. 7 corresponden al anuario meteorológico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de 1990 y se refieren a los registros de la estación M115 ubicada en San Antonio de Pichincha. La información recopilada, a pesar de ser de 1990, sufre variaciones anuales menores al 3% para la zona de estudio; esto permite que sea utilizada como referente de las condiciones ambientales actuales y en consecuencia como parámetros de diseño del presente proyecto.

Los valores estadísticos mensuales publicados en el anuario han sido obtenidos en base de tres observaciones diarias (07, 13 y 19 horas).

Los valores estadísticos mensuales de temperatura se obtienen con un mínimo de 20 días de registro de observaciones tanto para las temperaturas medias como para temperaturas absolutas. La temperatura media mensual resulta del promedio de las temperaturas medias diarias.

Los valores de humedad relativa son calculados en base a los datos de los termómetros de bulbo seco y de bulbo húmedo mediante las ecuaciones psicrométricas, con un mínimo de 20 días de registro. Los valores extremos de humedad relativa corresponden a la búsqueda de humedad de los datos calculados para cada observación de psicrómetro.

Se define como viento al movimiento del aire con respecto a la superficie de la tierra con una dirección y velocidad determinadas. Las direcciones se toman de donde viene o procede el viento. Se obtienen los valores medios mensuales de la velocidad del viento en [m/s] para cada una de las ocho direcciones (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) en base de 20 registros medios diarios calculados con las tres observaciones por día con instrumentos instalados a 10 metros de altura.

Las condiciones ambientales del sitio y las condiciones finales alcanzadas por el producto después de la operación de secado grano también tienen incidencia en el tiempo de almacenamiento permisible del grano sin que se corra el riesgo de que se

daño. Los tiempos de secado estable para varias temperaturas ambientales y contenidos de humedad del grano se presentan en la Figura 3. 4:

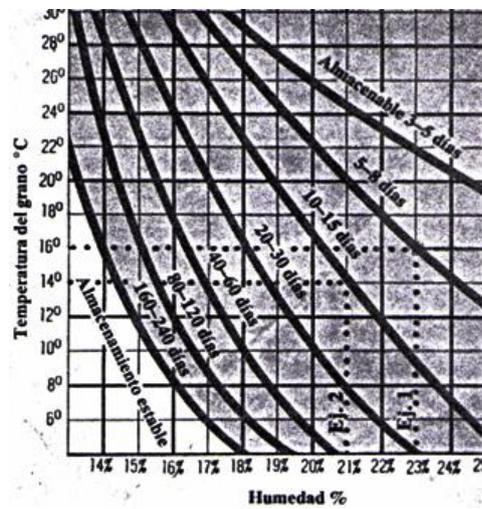


Figura 3. 4. Tiempo recomendado de almacenamiento del maíz.

3.2. Descripción de los subsistemas

3.2.1. Cámara de secado

La cámara de secado se encuentra arriba de la chapa perforada y en ella se coloca el material que va a ser secado. Sus dimensiones varían en función de la cantidad de granos que se va a secar. Por lo general se utiliza una capa de granos de 0,40-0,70 m de altura, ya que si se secan los granos con una altura superior se pueden presentar problemas de falta de uniformidad en el secado. Para evitar este problema se recomienda revolver los granos a intervalos regulares de 2 horas (véase Tabla 3. 3), de modo que al final del proceso su contenido de humedad sea uniforme. Si la capa de granos es muy alta, es difícil revolver los granos en forma manual. La altura de la cámara de secado es de 0,70 m y debe estar provista de puertas en sus paredes laterales con el objeto de permitir la descarga y el envasado del producto, y se deben colocar deflectores en sus esquinas para evitar la canalización del aire.

3.2.2. Lámina chapa perforada

La cámara de secado está separada de la cámara de distribución de aire por una lámina o chapa metálica perforada de 1,5 mm de espesor. Esta chapa debe tener perforaciones circulares de hasta 5 mm de diámetro, en un mínimo del 10 por ciento de su superficie total. La chapa perforada tiene el objetivo de sustentar el producto y permitir el paso de aire por la masa de granos.

3.2.3. Cámara de distribución de aire

La cámara de distribución de aire está debajo de la chapa perforada. La altura de esta cámara se dimensiona de modo que la velocidad del aire proveniente de la expansión gradual sea la menor posible, para evitar pérdidas de la presión del ventilador y facilitar la distribución del aire en la masa de granos. Generalmente, esta cámara se construye con una altura de 0,6 m, lo que facilita el proceso de envasar los productos durante la descarga del secador. La expansión gradual (campana difusora) es la parte del

secador de lecho fijo que conecta el ventilador con la cámara de distribución del aire. Su principal función, por lo tanto, es reducir la velocidad del aire que sale del ventilador.

El ángulo de abertura de la campana se debe calcular de modo que sea el menor posible para que la pérdida de presión del ventilador no sea muy elevada; sin embargo, se debe tener en cuenta la longitud de la campana difusora para que el ventilador no quede muy lejos de la cámara de distribución del aire, y para no aumentar innecesariamente el tamaño del conjunto.

3.2.4. Sistema de calentamiento de aire

El sistema de calentamiento de aire es directo, consiste en un quemador de tipo tobera que realiza la mezcla aire – combustible (gas propano) con el flujo de aire caliente dirigido hacia la succión del ventilador centrífugo. El quemador se alimenta con un conjunto de tanques de gas conectados entre sí mediante un múltiple.

El quemador utilizado en el proyecto (tipo tobera) consta de una válvula de compuerta para controlar la alimentación del gas, un quemador – dosificador, electrodos para el encendido, una válvula solenoide para la regulación de la cantidad de gas, un ventilador axial conectado a un motor eléctrico y un circuito de control eléctrico encargado de manipular la operación de los electrodos de encendido, motor eléctrico y válvula solenoide.

El reemplazo de diluyentes y mezclas de derivados de petróleo por el gas, tiene ventajas incuestionables, tales como:

- Su menor costo, reduce los gastos de energía.
- La menor contaminación de los granos debido a que la combustión es limpia.. No origina compuestos de azufre, como lo hacen los combustibles tipo gasoil, evitando así la corrosión de las partes metálicas de la secadora.
- El gas se encuentra en estado gaseoso, lo que permite una adecuada mezcla con el aire.

- La modulación infinitamente variable del quemador, a diferencia de la mayor dificultad para hacerlo con los quemadores a combustible diesel. La regulación es más fácil, rápida y limpia, disminuyendo los problemas de balanceo de cantidad de aire frío, de presión de combustible y temperatura existentes en los quemadores de gasoil.
- La posibilidad de poder medir el consumo de gas por medio del medidor respectivo.
- El tanque de gas licuado no requiere costosas limpiezas periódicas.

El gas licuado (propano y/o butano) es provisto en tanques. Es un producto líquido, que se gasifica rápidamente al abrir las válvulas, por la alta presión a la que está sometido. Requiere además, la provisión regular del mismo; contiene válvulas, manómetros, llaves, elementos de seguridad y conductos, además de los tanques o depósitos de gas.

Una incorrecta regulación del quemador de diesel propicia la formación de compuestos que son objetables. Algunos países, como Suiza, han prohibido el empleo de granos secados con combustibles líquidos como gasoil, fueloil, entre otros, o si no, exigen el uso de intercambiadores de calor para evitar la combustión directa (mezcla de los gases de combustión con el aire de secado).

Los intercambiadores de calor impiden la contaminación de los granos, pero reducen el rendimiento térmico total de la secadora de un 15-20%.

Tabla 3. 8. Poder calórico de combustibles

| Poder calórico de combustibles | | |
|--|-----------------------|---------------------|
| Combustible | Poder Calórico | Unidades |
| Alcohol etílico | 5829 | Kcal/kg |
| Bagazo de caña azúcar | 2200 a 3300 | Kcal/kg |
| Biogas | 4100 | Kcal/m ³ |
| Rastrojo de maíz | 3200 | Kcal/kg |
| Carbón mineral | 5200 a 7750 | Kcal/kg |
| Carbón vegetal | 6600 | Kcal/kg |
| Cáscara de arroz | 3900 | Kcal/kg |
| Gasolina (nafta) | 10500 | Kcal/kg |
| Kerosene | 10300 | Kcal/kg |
| Marlo de maíz (20% hum) | 3600 | Kcal/kg |
| Referencia: Enciclopedia Terranova 1995. | | |

Para utilizar gas licuado como combustible para la secadora, se debe contar con la provisión continua del mismo, lo que significa un depósito apropiado, el instrumental de regulación y control. Esta inversión debe estar a cargo del propietario de la empresa almacenadora.

El gas envasado se encuentra en estado líquido pero se puede gasificar con facilidad. Puede entonces alimentar a la secadora en forma líquida o gaseosa. La forma líquida evita los problemas de congelamiento, y la alimentación se hace por la parte inferior del depósito; cuando surge de la parte superior lo hace en forma gaseosa.

La alimentación líquida requiere una fuente de calor para su gasificación, que es generada por el propio gas en gasificadores del tipo serpentín. Se debe considerar que la utilización gas licuado en forma líquida es más peligroso; una pequeña pérdida de líquido dejará escapar una cantidad mucho mayor de gas que cuando se usa ya gasificado. Esto se debe a que el líquido al gasificarse aumenta de volumen en una proporción de 250 a 1. Los circuitos usados siempre deben estar provistos de válvulas y sistemas de seguridad para reducir los riesgos.

Uno de los modelos de quemadores de gas más utilizado es del tipo mezcla en tobera Figura 3. 5; puede incluir control automático de llama, pulsador, filtro, válvulas automáticas, manómetros, presostatos, entre otros.



Figura 3. 5. Quemador tipo tobera.

3.2.5. Ventilador

Un ventilador es cualquier dispositivo que produce una corriente de aire. Su clasificación obedece a la naturaleza del flujo que pasa a través de las aspas del rodete; de acuerdo a este punto de vista los rodetes o impulsores pueden ser de flujo axial, flujo radial, flujo mixto y flujo transversal. Por este motivo, ciertos nombres de ventiladores se derivan de la anterior clasificación. Otros nombres o tipos de ventiladores se obtienen de acuerdo a otros criterios tales como la forma de su carcasa.

El ventilador es el componente principal del secador, pues constituye la base fundamental de operación. Comercialmente se encuentran disponibles dos tipos de ventiladores: centrífugos y axiales.



Figura 3. 6. Ventilador centrífugo.

Los ventiladores centrífugos utilizan el rodete de flujo radial y tienen una carcasa en forma de espiral. El flujo de aire entra a la carcasa en forma axial y sale de ella en forma tangencial. Una porción considerable de energía que transfiere al aire una máquina de flujo radial es en forma de energía potencial, debido a la acción centrífuga. Es de este principio de donde obtiene la denominación de ventilador centrífugo. La capacidad para desarrollar presión de un ventilador de flujo radial depende de la longitud, altura, velocidad en punta y ángulo de las aspas. Cualquier tipo de ventilador tiene directa o indirectamente un arreglo de transmisión de fuerza.

3.2.6. Motor

Un motor es una máquina que convierte energía en movimiento o trabajo mecánico. La energía se suministra en forma de combustible químico, como gasóleo o gasolina, vapor de agua o electricidad, y el trabajo mecánico que proporciona suele ser el movimiento rotatorio de un árbol o eje.

Los motores se clasifican según el tipo de energía que utilizan, como motores de aire comprimido o de gasolina; según el tipo de movimiento de sus piezas principales, como alternativos o rotatorios; según dónde tiene lugar la transformación de energía química a calor se llaman de combustión interna o externa; según el método utilizado para enfriar el motor se clasifican en refrigerados por agua o por aire; según la posición de sus cilindros, alineados o en V; según las fases por las que pasa el pistón para completar un ciclo, como de dos tiempos o de cuatro, y según el tipo de ciclo,

como tipo Otto (el de los motores de gasolina) o diesel. Ciertos motores transforman energía eléctrica en energía mecánica.

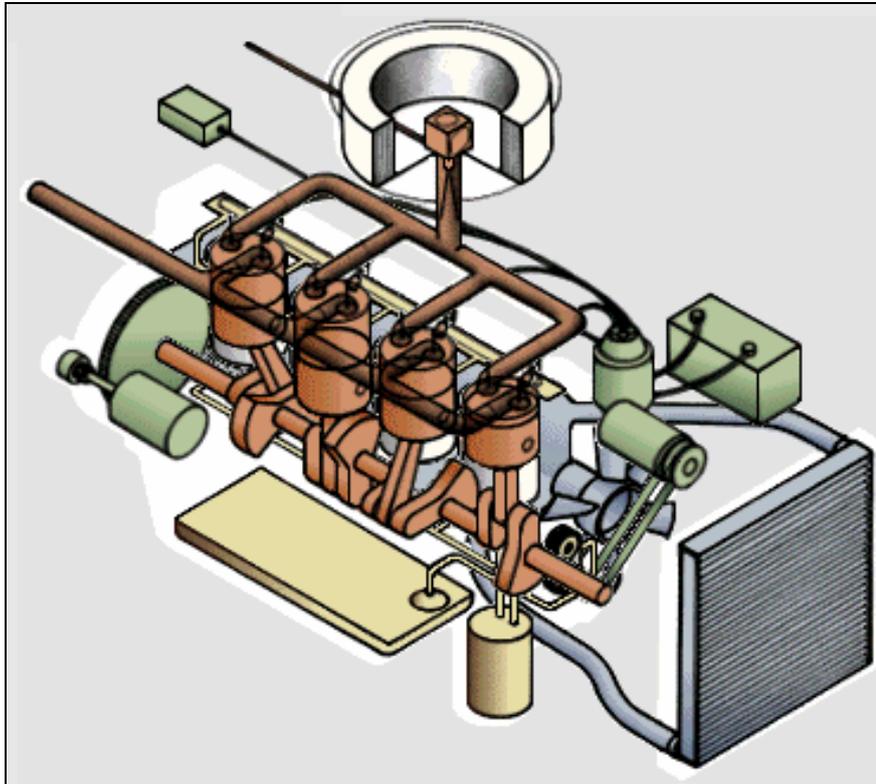


Figura 3. 7. Diagrama de un motor de combustión interna.

El motor diesel, llamado así en honor del ingeniero alemán Rudolf Diesel, se emplea en instalaciones generadoras de electricidad, en sistemas de propulsión naval, en camiones, autobuses y algunos automóviles.

La cámara de combustión es un cilindro, por lo general fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón muy ajustado al interior. La posición hacia dentro y hacia fuera del pistón modifica el volumen que existe entre la cara interior del pistón y las paredes de la cámara. La cara exterior del pistón está unida por un eje al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón. En los motores de varios cilindros el cigüeñal tiene una posición de partida, llamada espiga de cigüeñal y conectada a cada eje, con lo que la energía producida por cada cilindro se aplica al cigüeñal en un punto determinado de la rotación. Los

cigüeñales cuentan con pesados volantes y contrapesos cuya inercia reduce la irregularidad del movimiento del eje. Un motor puede tener de 1 a 28 cilindros.

El sistema de bombeo de combustible de un motor de combustión interna consta de un depósito, una bomba de combustible y un dispositivo que vaporiza o atomiza el combustible líquido. En los motores de varios cilindros el combustible vaporizado se conduce a los cilindros a través de un tubo ramificado llamado colector de admisión. Muchos motores cuentan con un colector de escape o de expulsión, que transporta los gases producidos en la combustión. Cada cilindro toma el combustible y expulsa los gases a través de válvulas de cabezal o válvulas deslizantes. Un muelle mantiene cerradas las válvulas hasta que se abren en el momento adecuado, al actuar las levas de un árbol de levas rotatorio movido por el cigüeñal.

Dado que la combustión produce calor, todos los motores deben disponer de algún tipo de sistema de refrigeración. Algunos motores estacionarios de automóviles y de aviones y los motores fuera de borda se refrigeran con aire. En otros motores se utiliza refrigeración por agua, lo que implica que los cilindros se encuentran dentro de una carcasa llena de agua que en los automóviles se hace circular mediante una bomba. El agua se refrigera al pasar por las láminas de un radiador.

Los motores de combustión interna utilizan un motor eléctrico (el motor de arranque) conectado al cigüeñal por un embrague automático que se desacopla en cuanto arranca el motor.

En teoría, el ciclo diesel difiere del ciclo Otto en que la combustión tiene lugar a un volumen constante en lugar de a una presión constante. La mayoría de los motores diesel tienen también cuatro tiempos, si bien las fases son diferentes de las de los motores de gasolina. En la primera fase se absorbe solamente aire hacia la cámara de combustión. En la segunda fase, la de compresión, el aire se comprime a una fracción mínima de su volumen original y se calienta hasta unos 440 °C a causa de la compresión. Al final de la fase de compresión el combustible vaporizado se inyecta dentro de la cámara de combustión y arde inmediatamente a causa de la alta temperatura del aire. Algunos motores diesel utilizan un sistema auxiliar de ignición para encender el combustible para arrancar el motor y mientras alcanza la temperatura adecuada. La

combustión empuja el pistón hacia atrás en la tercera fase, la de potencia. La cuarta fase es, al igual que en los motores Otto, la fase de expulsión.

La eficiencia de los motores diesel, que en general depende de los mismos factores que los motores Otto, es mayor que en cualquier motor de gasolina, llegando a superar el 40%. Los motores diesel suelen ser motores lentos con velocidades de cigüeñal de 100 a 750 revoluciones por minuto (rpm), mientras que los motores Otto trabajan de 2.500 a 5.000 rpm. No obstante, algunos tipos de motores diesel pueden alcanzar las 2.000 rpm. Como el grado de compresión de estos motores es de 14 a 1, son por lo general más pesados que los motores Otto, pero esta desventaja se compensa con una mayor eficiencia y el hecho de que utilizan combustibles más baratos.

Para la transmisión de potencia se puede utilizar elementos como bandas y poleas, cadenas y catalinas, juegos de engranes, de acuerdo a la velocidad de operación y la potencia transmitidas entre el componente conductor y el componente conducido.

Tabla 3. 9. Tipo de transmisión.

| Tipo de transmisión | | |
|--|-------------------------------|-----------------|
| Aplicación | Velocidad de operación | Potencia |
| Bandas y poleas | Alta | Media, baja |
| Cadenas y catalinas | Baja | Alta |
| Juegos de engranes (cajas reductoras) | Alta y baja | Alta |
| Referencia: Autores | | |

3.3. Determinación de las variables del lecho estacionario

3.3.1. Cámara de secado

La Figura 3. 8 muestra un diagrama de la disposición de los elementos instalados antes de iniciar el presente proyecto:

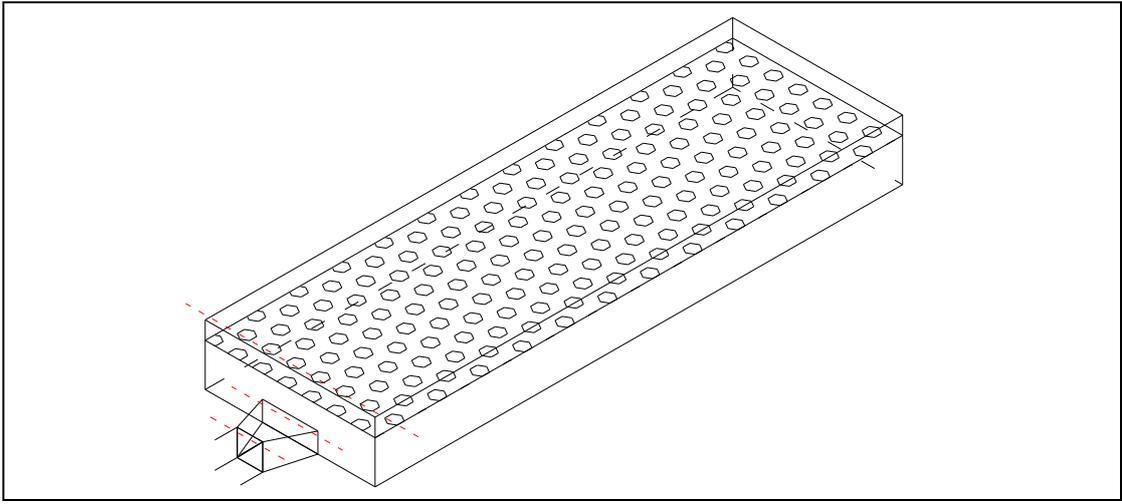


Figura 3. 8. Diagrama de la cámara de secado.

La Tabla 3. 10 resume las dimensiones generales de la cámara de secado.

Tabla 3. 10. Dimensiones generales de la cámara de secado.

| Dimensiones generales de la cámara de secado | | | |
|---|---|-------|-------------------|
| Largo | L | 11,80 | [m] |
| Ancho | a | 3,80 | |
| Altura del lecho | H | 0,75 | |
| Altura de la cámara | h | 0,96 | |
| Área del secador | A | 44,84 | [m ²] |
| Volumen del lecho | V | 33,63 | [m ³] |
| Referencia: Mediciones en San Antonio.. 22 - 07 – 2003. | | | |

A partir de las dimensiones geométricas de la cámara de secado y de las recomendaciones acerca de la altura del lecho se determinaron el área del secador y el volumen del lecho.

$$A = L.a$$

Ecuación 3. 7

Donde:

$$A \rightarrow \text{Área de la cámara de secado } [m^2]$$

$$L \rightarrow \text{Longitud de la cámara de secado } [m]$$

$$a \rightarrow \text{Ancho de la cámara de secado } [m]$$

$$A = L.a$$

$$A = (11,8)(3,8)$$

$$A = 44,84[m^2]$$

$$V = A.H$$

Ecuación 3. 8

Donde:

$$V \rightarrow \text{Volumen del lecho de maíz } [m^3]$$

$$H \rightarrow \text{Altura de maíz dentro de la cámara de secado } [m]$$

$$V = A.H$$

$$V = (44,84)(0,75)$$

$$V = 33,63[m^3]$$

A continuación se tomaron las propiedades del maíz de la Tabla 3. 3. como referencia. Debido a que el maíz que se va a someter al proceso de secado posee diferentes características de forma, tamaño, peso, porosidad y densidad (real y aparente) que el analizado en la bibliografía se procedió a realizar ensayos en los laboratorios de la ESPE para trabajar con valores reales, que se muestran en la Tabla 3. 11.

Tabla 3. 11. Valores medidos de las características del maíz.

| Valores medidos de las características del maíz | | | | | |
|---|------------|------------|------------|----------|----------------------|
| Característica | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Promedio | Unidades |
| Volumen aparente | 400,0 | 400,0 | 250,0 | 350,0 | [ml] |
| Masa recipiente | 66,7 | 66,7 | 66,7 | 66,7 | [gr] |
| Masa maíz | 353,1 | 347,8 | 246,5 | 315,8 | |
| Volumen inicial agua | 300,0 | 300,0 | 400,0 | 333,3 | [ml] |
| Volumen final agua y maíz | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 | |
| Volumen real | 250,0 | 250,0 | 150,0 | 216,7 | |
| Densidad real | 1,41 | 1,39 | 1,64 | 1,48 | [gr/ml] |
| Densidad aparente | 0,88 | 0,87 | 0,99 | 0,91 | |
| Densidad real | 1.412,40 | 1.391,20 | 1.643,33 | 1482,31 | [Kg/m ³] |
| Densidad aparente | 882,75 | 869,50 | 986,00 | 912,75 | |
| Porosidad | 37,50 | 37,50 | 40,00 | 38,33 | [%] |
| Contenido de humedad recomendado para almacenamiento | - | - | - | 14,00 | |
| Contenido de humedad inicial del grano | | | | 20,00 | |
| Referencia: Ensayos Laboratorio de Física de la ESPE. 23 – 07 –2003 | | | | | |

Los cálculos para determinar la densidad real y aparente y la porosidad se realizaron mediante las ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.11 tomando los datos de cada medición y posteriormente un valor promedio.

$$\delta_r = \frac{m}{V_r} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 3. 9

Donde:

$$\delta_r \rightarrow \text{Densidad real del producto} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$m \rightarrow \text{Masa de maíz} [g].$$

$$V_r \rightarrow \text{Volumen real del producto,} [ml]..$$

$$\delta a = \frac{m}{V_a} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 3. 10

Donde:

$$\delta a \rightarrow \text{Densidad aparente del maíz} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$V_a \rightarrow \text{Volumen aparente del maíz} [ml].$$

$$P = 1 - \left[\frac{\delta a}{\delta r} \right] \times 100 [\%]$$

Ecuación 3. 11

Donde:

$$P \rightarrow \text{Porosidad del maíz} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Para la primera medición de masa, volumen real y aparente, se obtuvieron los siguientes valores:

$$\delta r = \frac{m}{V_r} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\delta r = \frac{353,1(gr)}{250(ml)} \cdot \left| \frac{1 (Kg)}{1.000 (gr)} \right| \cdot \left| \frac{1'000.000 (ml)}{1 (m^3)} \right|.$$

$$\delta r = 1.412,40 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\delta a = \frac{m}{V_a} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\delta a = \frac{353,1(gr)}{400(ml)} \cdot \left| \frac{1 (Kg)}{1.000 (gr)} \right| \cdot \left| \frac{1'000.000 (ml)}{1 (m^3)} \right|.$$

$$\delta a = 882,75 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$P = 1 - \left[\frac{1.412,40}{882,75} \right] \times 100 [\%]$$

$$P = 37,50 [\%]$$

Se repitieron los cálculos para las siguientes mediciones y se obtuvieron los siguientes valores promedio:

$$\delta r = 1.482,31 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\delta a = 912,75 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$P = 38,33 \quad [\%]$$

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. 12. Valores calculados de las características del maíz.

| Valores calculados de las características del maíz | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| Característica | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Promedio | Unidades |
| Densidad real | 1,41 | 1,39 | 1,64 | 1,48 | [gr/ml] |
| Densidad aparente | 0,88 | 0,87 | 0,99 | 0,91 | |
| Densidad real | 1.412,40 | 1.391,20 | 1.643,33 | 1482,31 | [Kg/m ³] |
| Densidad aparente | 882,75 | 869,50 | 986,00 | 912,75 | |
| Porosidad | 37,50 | 37,50 | 40,00 | 38,33 | [%] |
| Contenido de humedad recomendado para almacenamiento | - | - | - | 14,00 | |
| Contenido de humedad inicial del grano | | | | 20,00 | |
| Referencia: Ensayos Laboratorio de Física de la ESPE. 23 – 07 –2003 | | | | | |

La masa total de maíz se calculó a partir de la ecuación 3.12. Después se realizó el cálculo de la cantidad de agua que se debe remover del grano durante el proceso de secado:

$$m = \alpha \cdot Va [Kg] \quad \text{Ecuación 3. 12}$$

$$m = (912,75)(33,63)$$

$$m = 30.695,78 [Kg] = 30,70 [Ton] = 675,31 [qq]$$

La masa de agua del maíz que se va a remover se calculó a partir de la ecuación 3.13

$$mw = \frac{m}{(1 - \varphi_2)} (\varphi_1 - \varphi_2) [Kg] \quad \text{Ecuación 3. 13}$$

Donde:

mw → Masa de agua en el maíz [Kg]

φ_1 → Contenido de humedad inicial del grano (base húmeda) [%].

φ_2 → Contenido de humedad final del grano (base húmeda) [%].

$$mw = \frac{30.695,78}{(1 - 0,14)} (0,20 - 0,14)$$

$$mw = 2141,47 \quad [Kg]$$

3.3.2. Chapa perforada.

La Figura 3. 9 muestra un diagrama general de la chapa perforada que soporta el peso de los granos de maíz realizado con medidas y elementos reales.

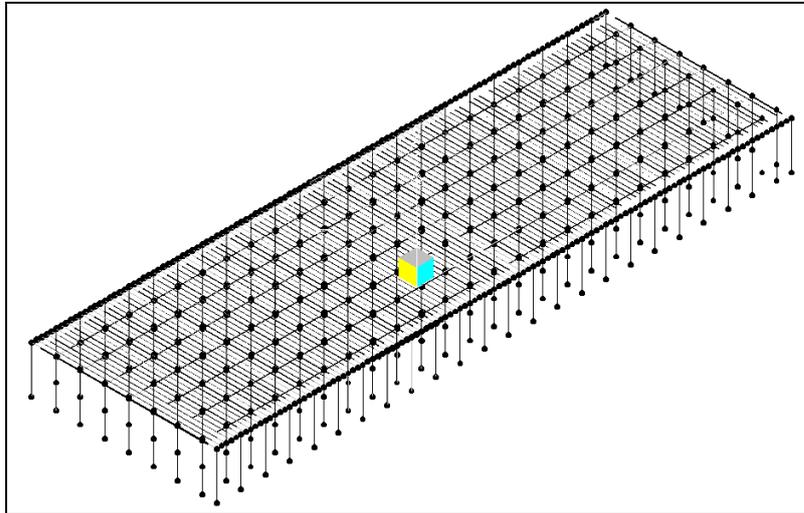


Figura 3. 9. Diagrama Chapa perforada.

La estructura que soporta la masa de maíz es un conjunto formado por los siguientes elementos, (véase Anexo B):

- Placa de acero de 1/16 [plg.] de espesor perforada con agujeros de 0,005 [m] de diámetro, la distancia entre centros de las perforaciones es 0,01 [m], como se muestra en la Figura 3. 9.
- Pórticos formados por varillas de acero de construcción de ½ [plg] de diámetro, como columnas y vigas principales.
- Vigas secundarias de acero de construcción de 3/8 [plg] de diámetro.
- Perfil L de acero de construcción de 1x1x1/8 [plg], como marco de toda la estructura.

Para la estructura estudiada, las columnas soportan la carga total que consiste en el peso del maíz (carga muerta), el eventual peso de un trabajador (carga viva) y el propio peso de la estructura (carga muerta).

El peso de la plancha de 1/16 [plg] fue determinado a partir de una sección de 0,5 x 0,5 [m], Figura 3. 10 en la cual se determinó un área efectiva (disminuyendo el área de las perforaciones), los cálculos se muestran a continuación y los resultados se observan en la Tabla 3. 13:

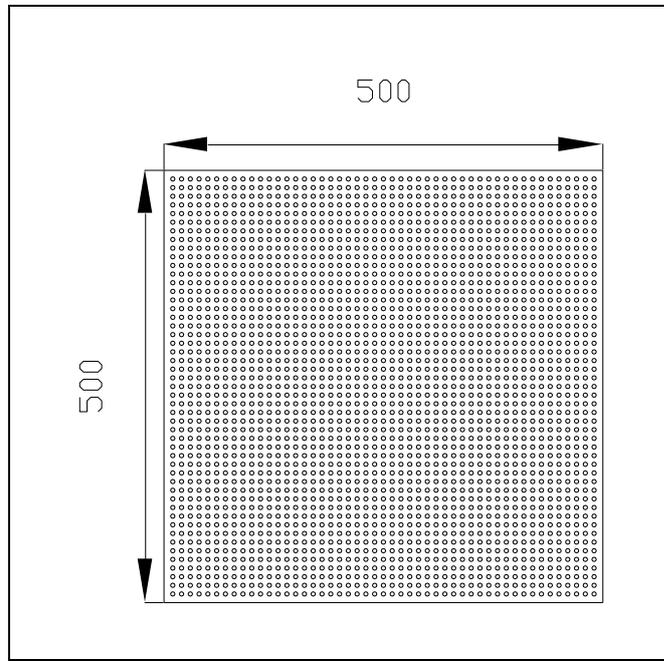


Figura 3. 10. Sección de placa perforada de 0,5 [m] x 0,5 [m].

El área de la sección es:

$$A_s = L_s^2$$

Ecuación 3. 14

$$A_s = 0,5^2$$

$$A_s = 0,25[m^2]$$

El área de cada perforación es:

$$A_{p_u} = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4}$$

Ecuación 3. 15

$$Ap_u = \frac{\pi \cdot (0,005^2)}{4}$$

$$Ap_u = 0,001963 [m^2]$$

Se calculó el área total de las perforaciones en la sección:

$$Ap_T = \# \text{ perforaciones} \times Ap \quad \text{Ecuación 3. 16}$$

$$Ap_T = (50 \times 50) \times 0,00001963$$

$$Ap_T = 0,04909 [m^2]$$

Se obtuvo el área efectiva de la sección de placa perforada:

$$Ae = As - Ap_T \quad \text{Ecuación 3. 17}$$

$$Ae = 0,25 - 0,04909$$

$$Ae = 0,2009 [m^2]$$

El volumen efectivo de la placa perforada se obtuvo multiplicando el área efectiva por el espesor.

$$Ve = Ae \times e \quad \text{Ecuación 3. 18}$$

$$Ve = 0,2009 \times 0,0015875$$

$$Ve = 3,1894 \times 10^{-4} [m^3]$$

El peso de la placa perforada se calculó multiplicando el volumen efectivo por la densidad del material.

$$Ps = Ve \times \delta a \quad \text{Ecuación 3. 19}$$

$$P_s = 3,1894 \times 10^{-4} [m^3] \times 7820 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$P_s = 2.49 [Kg]$$

Tabla 3. 13. Cálculo del peso de la plancha de acero de 1/16 [plg].

| Cálculo del peso de la plancha de acero de 1/16 [plg]. | | | |
|---|----------------|-------------|-----------------|
| Dimensiones | Símbolo | | Unidades |
| Densidad acero construcción | δa | 7820,00 | [Kg/m³] |
| Espesor | Es | 0,0015875 | [m] |
| Ancho | Ls | 0,5 | |
| Longitud | Ls | 0,5 | |
| Número de perforaciones | Np | 2500,00 | [u] |
| Diámetro perforaciones | Dp | 5,000 | [mm] |
| | | 0,00500 | [m] |
| Área perforaciones | Apu | 0,00001963 | [m²] |
| Área total perforaciones | Apt | 0,04909 | |
| Área chapa perforada | As | 0,2500 | |
| Área efectiva chapa perforada | Ae | 0,2009 | |
| Volumen chapa perforada | Ve | 0,000318949 | [m³] |
| Peso sección chapa perforada | Ps | 2,49 | [Kg] |
| | | 24,44 | [N] |
| Referencia: Autores. | | | |

De la misma manera se calcularon los pesos de los elementos que actúan como vigas (varillas de 3/8" y 1/2"), los resultados se resumen en la Tabla 3. 14.

El área de la varilla de 3/8" es:

$$A_{v_1} = \frac{\pi \cdot (0,009525)^2}{4}$$

$$A_{v_1} = 7,126 \times 10^{-4} [m^2]$$

El volumen de la varilla de 3/8" es:

$$V_{v_1} = A_{v_1} \times L_s$$

Ecuación 3. 20

$$V_{v1} = (7,126 \times 10^{-4})(0,5)$$

$$V_{v1} = 3,5627 \times 10^{-5} [m^3]$$

El peso de las vigas (varillas de 3/8") se calculó multiplicando el número de varillas por su volumen y por la densidad del material.

$$P_{v1} = 4 \times 3,56279E-05 [m^3] \times 7800,00 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$P_{v1} = 1,11 [Kg]$$

Tabla 3. 14. Cálculo del peso de las vigas (Varillas 3/8").

| Cálculo del peso de las vigas (Varillas 3/8") | | | |
|---|-----|-------------|----------------------|
| Densidad | δb | 7800,00 | [Kg/m ³] |
| Diámetro | Dv1 | 0,3750 | [plg] |
| | | 0,009525 | [m] |
| Longitud | Ls | 0,50 | [m] |
| Número | nv1 | 4,00 | [u] |
| Área | Av1 | 0,00007126 | [m ²] |
| Volumen | Vv1 | 3,56279E-05 | [m ³] |
| Peso | Pv1 | 1,11 | [Kg] |
| | | 10,89 | [N] |
| Referencia: Autores | | | |

El área de la varilla de 1/2" es:

$$A_{v2} = \frac{\pi \cdot (0,0127)^2}{4}$$

$$A_{v2} = 1,2668 \times 10^{-4} [m^2]$$

El volumen de la viga de 1/2" es:

$$V_{v2} = A_{v2} \times Ls$$

$$V_{v2} = (1,2668 \times 10^{-4})(0,5)$$

$$V_{v2} = 6,3338 \times 10^{-5} [m^3]$$

El peso de las vigas (varillas de 1/2") se calculó multiplicando el número de varillas por su volumen y por la densidad del material.

$$P_{v2} = 4 \times 6,33384E-05 [m^3] \times 7800,00 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$P_{v2} = 1,98 [Kg]$$

Tabla 3. 15. Cálculo del peso de las vigas (Varillas 1/2").

| Cálculo del peso de las vigas (Varillas 1/2") | | | |
|--|-----|-------------|----------------------|
| Densidad | sb | 7800,00 | [Kg/m ³] |
| Diámetro | Dv2 | 0,5000 | [plg] |
| | | 0,0127 | [m] |
| Longitud | Ls | 0,50 | [m] |
| Número | nv2 | 4,00 | [u] |
| Área | Av2 | 0,00012668 | [m ²] |
| Volumen | Vv2 | 6,33384E-05 | [m ³] |
| Peso | Pv2 | 1,98 | [Kg] |
| | | 19,37 | [N] |
| Referencia: Autores | | | |

Se calculó el peso de los elementos que actúan como marco de la estructura (perfil L de 1" x 1" x 1/8"), los resultados se resumen en la Tabla 3. 16

El volumen del perfil es:

$$V_m = A_m \times L_s$$

Ecuación 3. 21

$$V_m = (1,5097 \times 10^{-4})(0,5)$$

$$V_m = 7,5484 \times 10^{-5} [m^3]$$

El peso del marco se calculó multiplicando el número de perfiles por su volumen y por la densidad del material.

$$P_p = 4 \times 7,54837E-05 [m^3] \times 7800,00 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$P_p = 2,36 [Kg]$$

Tabla 3. 16. Cálculo del peso del marco de acero (Perfil L 1"x1"x1/8").

| Cálculo del peso del marco de acero (Perfil L 1"x1"x1/8") | | | |
|--|----|-------------|----------------------|
| Densidad | δb | 7800,00 | [Kg/m ³] |
| Área | Ap | 0,23400 | [plg ²] |
| | | 150,96744 | [mm ²] |
| | | 0,00015097 | [m ²] |
| Longitud | Ls | 0,50 | [m] |
| Número | Np | 4,00 | [u] |
| Volumen | Vp | 7,54837E-05 | [m ³] |
| Peso | Pp | 2,36 | [Kg] |
| | | 23,08 | [N] |
| Referencia: Autores. | | | |

Se calculó el peso de los elementos que actúan como columnas (varillas de ½"), los resultados se resumen en la Tabla 3. 17

El volumen de la varilla de ½" es:

$$V_c = A_c \times L_s$$

Ecuación 3. 22

$$V_c = (1,2668 \times 10^{-4})(0,96)$$

$$V_c = 1,2161 \times 10^{-5} [m^3]$$

El peso de la columna (varillas de 1/2") se calculó multiplicando su volumen por la densidad del material

$$P_c = 0,00012161[m^3] \times 7800,00 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$P_c = 0,95[Kg]$$

Tabla 3. 17. Cálculo del peso de las columnas (Varillas 1/2").

| Cálculo del peso de las columnas (Varillas 1/2") | | | |
|---|------------|------------|----------------------|
| Densidad | δ_b | 7800,00 | [Kg/m ³] |
| Diámetro | Dc | 0,5000 | [plg] |
| | | 0,0127 | [m] |
| Longitud | Ls | 0,96 | [m] |
| Número | Nc | 1,00 | [u] |
| Área | Ac | 0,00012668 | [m ²] |
| Volumen | Vc | 0,00012161 | [m ³] |
| Peso | Pc | 0,95 | [Kg] |
| | | 9,30 | [N] |
| Referencia: Autores. | | | |

Se calculó entonces el peso por unidad de área del grano que soporta la sección de la estructura:

$$Pg_U = \frac{m}{A} \cdot As \tag{Ecuación 3. 23}$$

$$Pg_U = \frac{30675,98 \cdot 9,8}{44,84} \cdot 0,25$$

$$Pg_U = 1677,18[N]$$

De esta manera se determinó la Carga Muerta Total que debe soportar la estructura, incluido su propio peso. Además se consideró un 5% del peso de la estructura como peso del material de soldadura que une los diferentes elementos.

$$Pm = Pg_U + Ps + Pv_1 + Pv_2 + Pp + Pc \tag{Ecuación 3. 24}$$

$$P_m = 1677,18 + (24,44 + 10,89 + 19,37 + 23,08 + 9,30) \times (1,05)$$

$$P_m = 1768,61 [N]$$

La carga viva que se consideró corresponde al peso de una persona de 100 [Kg]

$$P_a = P_m + P_v$$

Ecuación 3. 25

$$P_a = 1768,61 + 980$$

$$P_a = 2748,61 [N]$$

Tabla 3. 18. Carga Total Aplicada a la estructura que soporta el maíz.

| Carga Total Aplicada a la estructura que soporta el maíz. | | | | | |
|--|-----|--------|-------------------|-----------|-----|
| Área total | | 44,84 | [m ²] | Soldadura | |
| Carga maíz | Pg | 171,14 | [Kg] | 1677,18 | [N] |
| Plancha de acero 1/16 " | Ps | 2,49 | | 24,44 | |
| Vigas (Varillas 3/8") | Pv1 | 1,11 | | 10,89 | |
| Vigas (Varillas 1/2") | Pv2 | 1,98 | | 19,37 | |
| Columnas (Varillas 1/2") | Pc | 0,95 | | 9,30 | |
| Marco Acero (Perfil L 1x1x1/8) | Pp | 2,36 | | 23,08 | |
| Soldadura | | 0,44 | | 4,35 | |
| Carga muerta total | Pm | 180,47 | | 1768,61 | |
| Carga viva | Pv | 100 | | 980,00 | |
| Carga total aplicada | Pa | 280,47 | | 2748,61 | |
| Referencia: Autores. | | | | | |

Las columnas de la estructura tienen un extremo soldado a las vigas principales y el otro extremo libre. La longitud efectiva de la columna se determinó utilizando el factor K que depende de las condiciones de apoyo de la columna. Estos valores se resumen en la Tabla 3. 19.

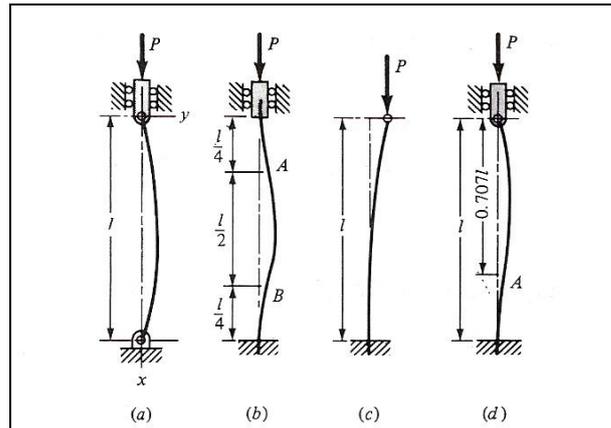


Figura 3. 11. Condiciones de apoyo de columnas largas

Tabla 3. 19. Condiciones de apoyo de columnas largas

| Condiciones de apoyo de columnas largas | | | |
|--|---------------|---------------|----------|
| Referencia Figura 3. 11 | Tipo de apoyo | | Factor K |
| (a) | Articulación | Libre | 4 |
| (b) | Empotramiento | Empotramiento | 1/4 |
| (c) | Empotramiento | Libre | 2 |
| (d) | Empotramiento | Redondeado | 1 |
| Referencia: Diseño en Ingeniería Mecánica. Joseph E. Shigley. (2001). Manual MARKS | | | |

En el análisis de elementos esbeltos, primero se determinó la relación de esbeltez mediante la ecuación 3.26

$$\lambda = \frac{k.L}{r}$$

Ecuación 3. 26

Donde:

$K \rightarrow$ Factor de condición de apoyo de la columna.

$L \rightarrow$ Longitud de la columna [m].

$r \rightarrow$ Radio de giro [m].

$$\lambda = \frac{2(0,96)}{(0,003175)}$$

$$\lambda = 604,72 > 30 \Rightarrow \text{Columna larga}$$

Para garantizar que una columna no falle por pandeo, se debe asegurar que la carga aplicada (P) sea menor que la carga crítica (P_{cr}) que se calculó mediante la ecuación de Euler 3.27

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad \text{Ecuación 3. 27}$$

Donde:

$E \rightarrow$ Módulo de elasticidad. [GPa], para el acero 207 [GPa].

$I \rightarrow$ Momento de Inercia. [m⁴]

El cálculo de la carga y el esfuerzo críticos, se muestra a continuación:

$$P_{cr} = \frac{(3,14^2)(207 \cdot 10^9)(1,27 \cdot 10^{-9})}{(0,96)^2} \quad [N]$$

$$P_{cr} = 2830,32 \quad [N]$$

Dado que los valores de las cargas y esfuerzos aplicados en el presente diseño son menores a los valores de las cargas y esfuerzos críticos que soporta la estructura se comprobó que la capacidad de carga del conjunto de la chapa perforada y su estructura de soporte es suficiente para que no exista falla por pandeo en las columnas. El resumen de las cargas y esfuerzos aplicados, así como las cargas y esfuerzos críticos se presenta en la tabla 3.19

Tabla 3. 20. Análisis estático de las columnas, según ec. Euler.

| Análisis estático de las columnas, según ec. Euler. | | | |
|--|-------------------|-----------|---------------------|
| Módulo de elasticidad | E | 207,00 | Gpa |
| | | 2,07E+11 | [N/m ²] |
| Inercia | I | 1,277E-09 | [m ⁴] |
| Radio de giro | R | 0,003175 | [m] |
| Longitud real | L | 0,960 | [m] |
| Relación de esbeltez | λ | 604,72 | |
| Factor de condición de apoyo | K | 2 | |
| Carga aplicada | P | 2.748,61 | [N] |
| Carga crítica | P _{crit} | 2830,32 | |
| Referencia: Autores. | | | |

3.3.3. Cámara de distribución de aire

Se calcularon las pérdidas de presión que se dan a través de los cambios de sección transversal tanto para la cámara de distribución de aire (Figura 3. 12) como para la cámara de secado, además de la pérdida de carga al atravesar el lecho de maíz.

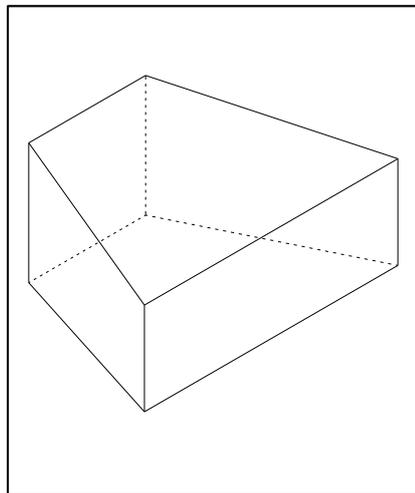


Figura 3. 12. Vista en perspectiva de la cámara de distribución de aire.

Para determinar las pérdidas de presión a través de todo el secador se tomaron en cuenta las tres secciones en donde existe un notorio cambio de dimensión. Esto implica la división longitudinal del secador, como se muestra en la Figura 3. 13:

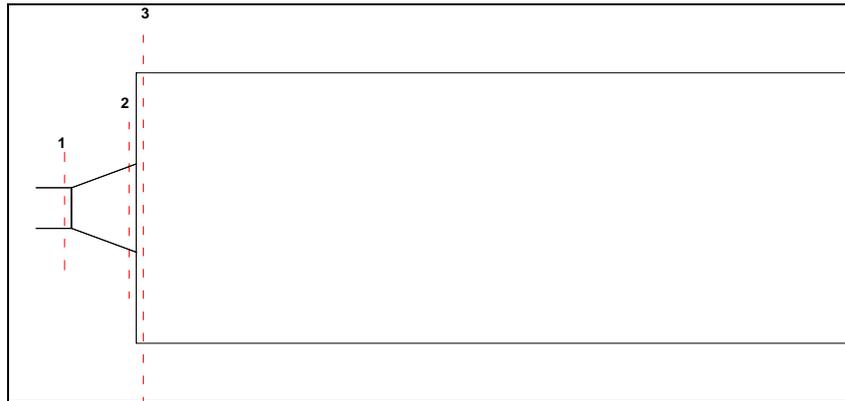


Figura 3. 13. Vista superior de los cambios de sección transversal

En la cámara de distribución de aire se tienen dos cambios de sección transversal (1 – 2) considerando la vista superior (dilatación gradual, Figura 3. 14) y la vista lateral (contracción gradual, Figura 3. 15).

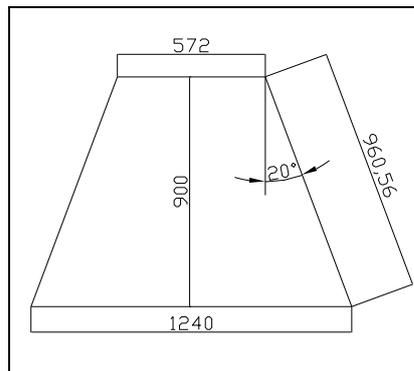


Figura 3. 14. Vista superior de la cámara de distribución de aire.

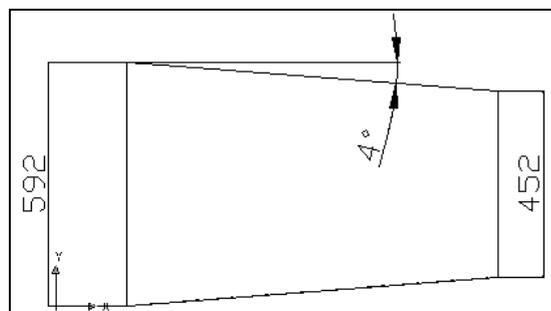


Figura 3. 15. Vista lateral de la cámara de distribución de aire.

Las áreas de las secciones 1, 2, 3 y 4 se calcularon con la ecuación 3.28 a partir de las dimensiones del fabricante²³ de la campana difusora y de las dimensiones de la cámara de secado, los datos y resultados se muestran en la Tabla 3. 21

$$A_i = a_i \times b_i$$

Ecuación 3. 28

Donde:

$A_i \rightarrow$ Área de la sección [m²].

$a_i, b_i \rightarrow$ Dimensiones de la sección [m].

Reemplazando valores tenemos:

$$\begin{array}{ll} A_1 = a_1 \times b_1 & A_2 = a_2 \times b_2 \\ A_1 = 0,592 \times 0,572 & A_2 = 0,452 \times 1,24 \\ A_1 = 0,339 [m^2] & A_2 = 0,560 [m^2] \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} A_3 = a_3 \times b_3 & A_4 = a_4 \times b_4 \\ A_3 = 0,96 \times 3,80 & A_4 = 11,80 \times 3,80 \\ A_3 = 3,648 [m^2] & A_4 = 44,84 [m^2] \end{array}$$

En la sección siguiente se justificará la determinación del caudal de aire que asegura un adecuado calentamiento del flujo de aire suministrado por el ventilador para obtener una tasa de secado apropiada, para el presente cálculo tomamos como dato un caudal de 8 [m³/s].

A partir de la ecuación de continuidad, donde se expresa que para cualquier fluido en un sistema de conducto cerrado el caudal se mantiene constante, calculamos las velocidades del flujo de aire²⁴ en cada sección a partir de la siguiente expresión:

²³ Catálogo Induhorst. Quevedo – Ecuador.

²⁴ La ecuación de continuidad $Q_1=Q_2$, se aplica para líquidos incompresibles y se puede utilizar para gases con baja velocidad (menor a 100 m/s).

$$v_i = \frac{Q}{A_i}$$

Ecuación 3. 29

Donde:

$v_i \rightarrow$ Velocidad del flujo de aire [m/s].

$Q \rightarrow$ Caudal de aire [m³/s].

$A_i \rightarrow$ Área de la sección transversal.

Entonces:

$$\begin{array}{cccc} v_1 = \frac{8}{0,339} & v_2 = \frac{8}{0,560} & v_3 = \frac{8}{3,648} & v_4 = \frac{8}{44,84} \\ v_1 = 23,63 \left[\frac{m}{s} \right] & v_2 = 14,27 \left[\frac{m}{s} \right] & v_3 = 2,19 \left[\frac{m}{s} \right] & v_4 = 0,18 \left[\frac{m}{s} \right] \end{array}$$

Por tratarse de secciones transversales rectangulares se calcularon primero los diámetros equivalentes de acuerdo a la siguiente expresión:

$$De_i = \frac{1,3(a_i \times b_i)^{5/8}}{(a_i + b_i)^{1/4}}$$

Ecuación 3. 30

Donde:

$De \rightarrow$ Diámetro equivalente para un ducto rectangular.

$a, b \rightarrow$ Lados de la sección rectangular.

$$\begin{array}{cc} De_1 = \frac{1,3(0,592 \times 0,572)^{5/8}}{(0,592 + 0,572)^{1/4}} & De_2 = \frac{1,3(0,452 \times 1,24)^{5/8}}{(0,452 + 1,24)^{1/4}} \\ De_1 = 2,27 [m] & De_2 = 2,14 [m] \end{array}$$

$$\begin{array}{cc} De_3 = \frac{1,3(0,96 \times 3,80)^{5/8}}{(0,96 + 3,80)^{1/4}} & De_4 = \frac{1,3(11,80 \times 3,80)^{5/8}}{(11,80 \times 3,80)^{1/4}} \\ De_3 = 2,45 [m] & De_4 = 3,59 [m] \end{array}$$

Para una dilatación de sección transversal, la relación de diámetros se obtiene dividiendo el diámetro equivalente de salida para el diámetro equivalente de la entrada de aire.

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{\text{Diámetro equivalente de salida de aire}}{\text{Diámetro equivalente de entrada de aire}}. \quad \text{Ecuación 3. 31}$$

Para las contracciones de sección transversal, la relación de diámetros se obtuvieron dividiendo el diámetro equivalente de entrada para el diámetro equivalente de la salida de aire.

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\text{Diámetro equivalente de entrada de aire}}{\text{Diámetro equivalente de salida de aire}}. \quad \text{Ecuación 3. 32}$$

Una vez obtenidos los diámetros equivalentes de las secciones rectangulares, de entrada y salida del ducto, se calcularon los coeficientes de resistencia a partir de gráficas experimentales donde se relacionan la relación de diámetros equivalentes de entrada y salida (relación de diámetros) con la velocidad del flujo de aire o con la geometría de la contracción/dilatación.

$$\begin{array}{cccc} \frac{D_1}{D_2} = \frac{2,27}{2,14} & \frac{D_2}{D_1} = \frac{2,14}{2,27} & \frac{D_3}{D_2} = \frac{2,45}{2,14} & \frac{D_4}{D_3} = \frac{3,59}{2,45} \\ \frac{D_1}{D_2} = 1,06 & \frac{D_2}{D_1} = 0,94 & \frac{D_3}{D_2} = 1,15 & \frac{D_4}{D_3} = 1,46 \end{array}$$

A cada relación de diámetros le corresponde un factor $K_{i,j}$ tomado de las Figura 3. 16 - Figura 3. 18 (véanse Anexo A. 1 - Anexo A. 3), de acuerdo al caso en que se encuentre cada cambio de sección.

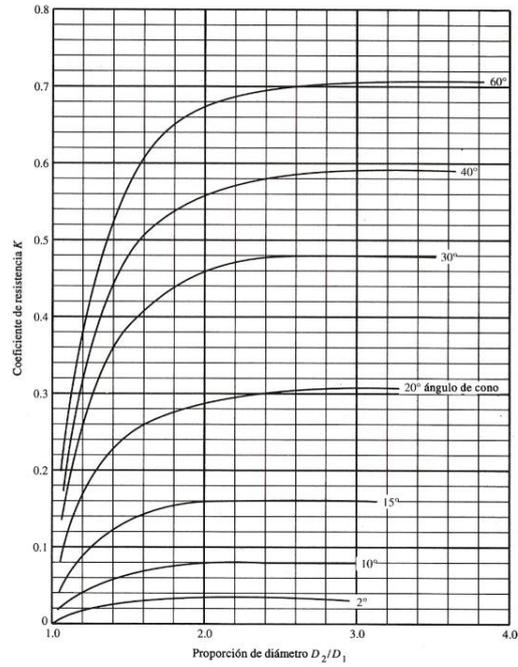


Figura 3. 16. Dilatación gradual.

$K_{1-2} = 0,02$ (dilatación gradual, $\theta = 40^\circ$, Anexo A. 1)

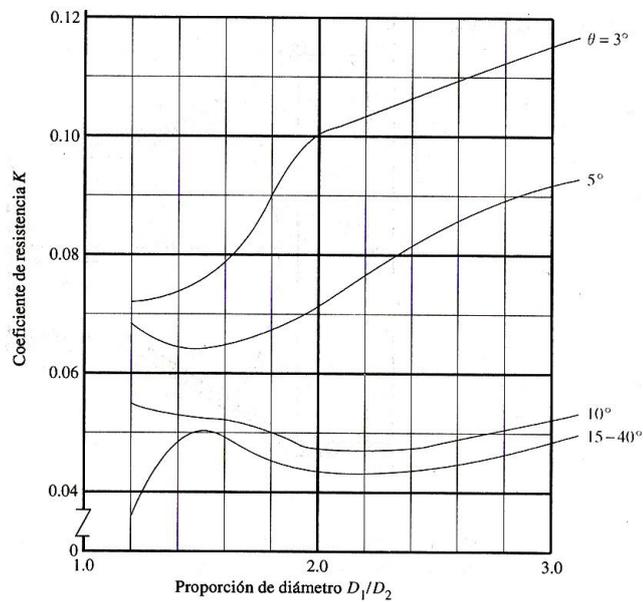


Figura 3. 17. Contracción gradual

$K_{1-2} = 0,06$ (contracción gradual, $\theta = 8^\circ$, Anexo A.2.)

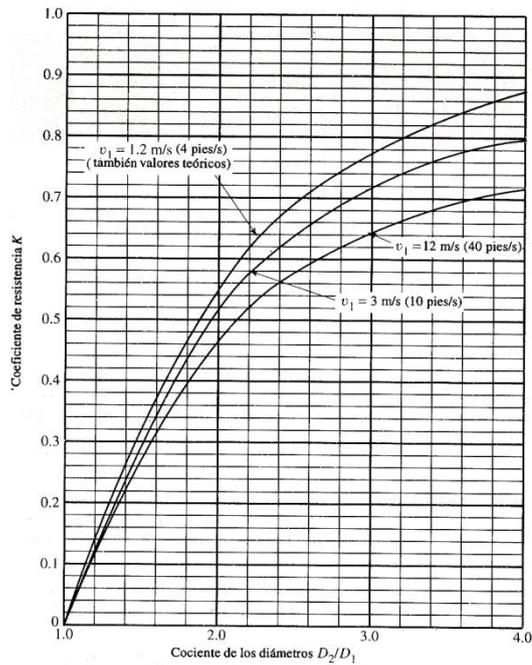


Figura 3. 18. dilatación súbita

$K_{2-3} = 0,08$ (dilatación súbita, $v_2 = 14,27$ [m/s], Anexo A. 3)

$K_{3-4} = 0,29$ (dilatación súbita, $v_3 = 2,19$ [m/s], Anexo A. 3)

Las pérdidas de presión en cada cambio de sección se calcularon a partir de la expresión:

$$h_{L_i} = K_{i-j} \cdot \left(\frac{v_i^2}{2 \cdot g} \right) \quad \text{Ecuación 3. 33}$$

Donde:

h_{L_i} → Pérdida de presión de aire [m].

K_{i-j} → Coeficiente del flujo de aire [m³/s].

v_i → Velocidad del flujo de aire [m/s].

g → Gravedad [m/s²].

$\left(\frac{v_i^2}{2 \cdot g} \right)$ → Cabeza de velocidad [m].

Dado que las unidades de h_{L_i} son las mismas que las unidades de la cabeza de velocidad [m], es necesario multiplicar el resultado por el peso específico del aire en las condiciones del aire dentro de la cámara (Estado 2).

$$\gamma_{a2} = \frac{1}{va_2}$$

$$\gamma_{a2} = \frac{1}{1,3594 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]} \times 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$\gamma_{a2} = 7,22 \left[\frac{N}{m^3} \right]$$

$$h_{L1} = (0,1567) \left(\frac{23,63_1^2}{2 \times 9,81} \right)$$

$$h_{L1} = 0,2077 \left[m \right]$$

$$h_{L1} = 1,4987 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$h_{L2} = (0,06) \left(\frac{14,27^2}{2 \times 9,81} \right)$$

$$h_{L2} = 0,6230 \left[m \right]$$

$$h_{L2} = 4,4962 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$h_{L3} = (0,08) \left(\frac{14,27^2}{2 \times 9,81} \right)$$

$$h_{L3} = 0, \left[m \right]$$

$$h_{L3} = 5,9950 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$h_{L4} = (0,29) \left(\frac{2,19^2}{2 \times 9,81} \right)$$

$$h_{L4} = 0,0711 \left[m \right]$$

$$h_{L4} = 0,5130 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Tabla 3. 21 Pérdidas de presión a través del Secador

| Pérdidas de presión a través del secador | | | | | | |
|--|----------|-----------|---------------------|-----------|-----------|-------------------|
| Dimensiones | | Sección 1 | Sección 2 | Sección 3 | Sección 4 | |
| Altura | b_i | 0,592 | 0,452 | 0,96 | 11,80 | [m] |
| Ancho | a_i | 0,572 | 1,24 | 3,80 | 3,80 | |
| Longitud | | | 0,9 | 11,80 | 0,96 | |
| Área entrada | A_i | 0,339 | 0,560 | 3,648 | 44,840 | [m ²] |
| Velocidad de flujo | v_i | 23,63 | 14,27 | 2,19 | 0,18 | [m/s] |
| Diámetro equivalente | De_i | 2,27 | 2,14 | 2,45 | 3,59 | |
| Cabeza de presión1 | H_{Li} | 28,4476 | 10,3839 | 0,2451 | 0,0016 | [m] |
| Peso específico | γ | 7,22 | [N/m ³] | | | |
| Referencia: Autores. | | | | | | |

Tabla 3. 22. Pérdidas de Presión a través del secador

| Pérdidas de Presión | | | |
|---|----------|-----------|-----|
| Dilatación gradual. Secciones 1 - 2 (Tomada contracción) | | | |
| Coeficiente de resistencia (área) | K_i | 0,02 | |
| Relación D2/D1 | | 1,0608913 | |
| Pérdida de carga 1 | h_{L1} | 0,2077 | [m] |
| | | 1,4987 | Pa |
| Estrangulamiento gradual. Secciones 1 – 2 | | | |
| Relación D1/D2 | | 1,06 | |
| Coeficiente de resistencia (área) | K | 0,0600 | |
| Pérdida de carga 2 | h_{L2} | 0,6230 | [m] |
| | | 4,4962 | Pa |
| Dilatación súbita. Secciones 2 – 3 | | | |
| Coeficiente de resistencia | | 0,08 | |
| Relación D3/D2 | | 1,15 | |
| Pérdida de carga 3 | h_{L3} | 0,8307 | [m] |
| | | 5,9950 | Pa |
| Dilatación súbita. Secciones 3 – 4 | | | |
| Coeficiente de resistencia (área) | K | 0,29 | |
| Relación D4/D3 | | 1,46 | |
| Pérdida de carga 4 | h_{L4} | 0,0711 | [m] |
| | | 0,5130 | Pa |
| Referencia: Autores. | | | |

3.3.4. Sistema de calentamiento de aire

Para el presente diseño se consultaron en el INAMHI las condiciones ambientales del sector donde está ubicada la secadora de granos y se tomaron las condiciones más adversas posibles para el diseño del sistema de secado y la posterior selección de componentes de la Tabla 3. 7 (Temperatura mínima absoluta anual $T_{as1}=4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $hr1 = 100\%$). Luego, mediante la utilización de un software para Excel²⁵, se calcularon las propiedades psicrométricas del punto 1, que constituyen las condiciones iniciales del aire de secado. Los resultados se presentan en la Tabla 3. 23. y posteriormente se realizaron las conversiones de unidades, Tabla 3. 24.

²⁵ Psyfunc Psychrometric Functions Calculation Demo. Software de cálculo de las propiedades psicrométricas del aire para Excel de Linric Company.

Tabla 3. 23.Cálculos Psicrométricos . Estado 1.

| Cálculos Psicrométricos - Estado 1 | | | | |
|---|---------|---------------------|---------|-----------|
| Entradas | | | | |
| Temperatura bulbo seco | 40,6 | °F | 4,80 | °C |
| Temperatura bulbo húmedo | 40,6 | °F | 4,80 | °C |
| Elevación sobre el nivel del mar | 7.972,4 | Ft. | 2.430,0 | M |
| Salidas | | | | |
| Presión atmosférica | 22,22 | In. Hg | 10,91 | Psi |
| Presión de vapor a la saturación | 0,254 | In. Hg | 0,12 | Psi |
| Presión de vapor | 0,254 | In. Hg | 0,12 | Psi |
| Temperatura de punto de rocío | 40,7 | °F | | |
| Humedad relativa | 100,0 | Percent | | |
| Relación de humedad | 0,0072 | lb/lb | 50,3 | grains/lb |
| Entalpía | 17,5 | Btu/lb | | |
| Volumen específico | 17,17 | Ft ³ /lb | | |
| Referencia: Autores. | | | | |

Tabla 3. 24.Condiciones aire – Estado 1.

| Condiciones aire – Estado 1 | | | | | | |
|------------------------------------|----------|---------|----------------------|---------|-----------------------|---------|
| Temperatura (bulbo seco) | Tas1 | 4,80 | [°C] | 40,64 | [°F] | Punto 1 |
| Temperatura bulbo húmedo | Tah1 | 4,80 | | 40,64 | | |
| Humedad relativa | hr1 | 1,0000 | [%] | 100,00 | [%] | |
| Razón de humedad | ω | 0,0072 | [Kg agua/Kg aire] | 0,0072 | [lb/lb] | |
| Volumen específico | va1 | 1,0699 | [m ³ /Kg] | 17,1742 | [ft ³ /lb] | |
| Entalpía | ha1 | 40,7321 | [KJ/Kg] | 17,5116 | [BTU/lb] | |
| Referencia: Autores. | | | | | | |

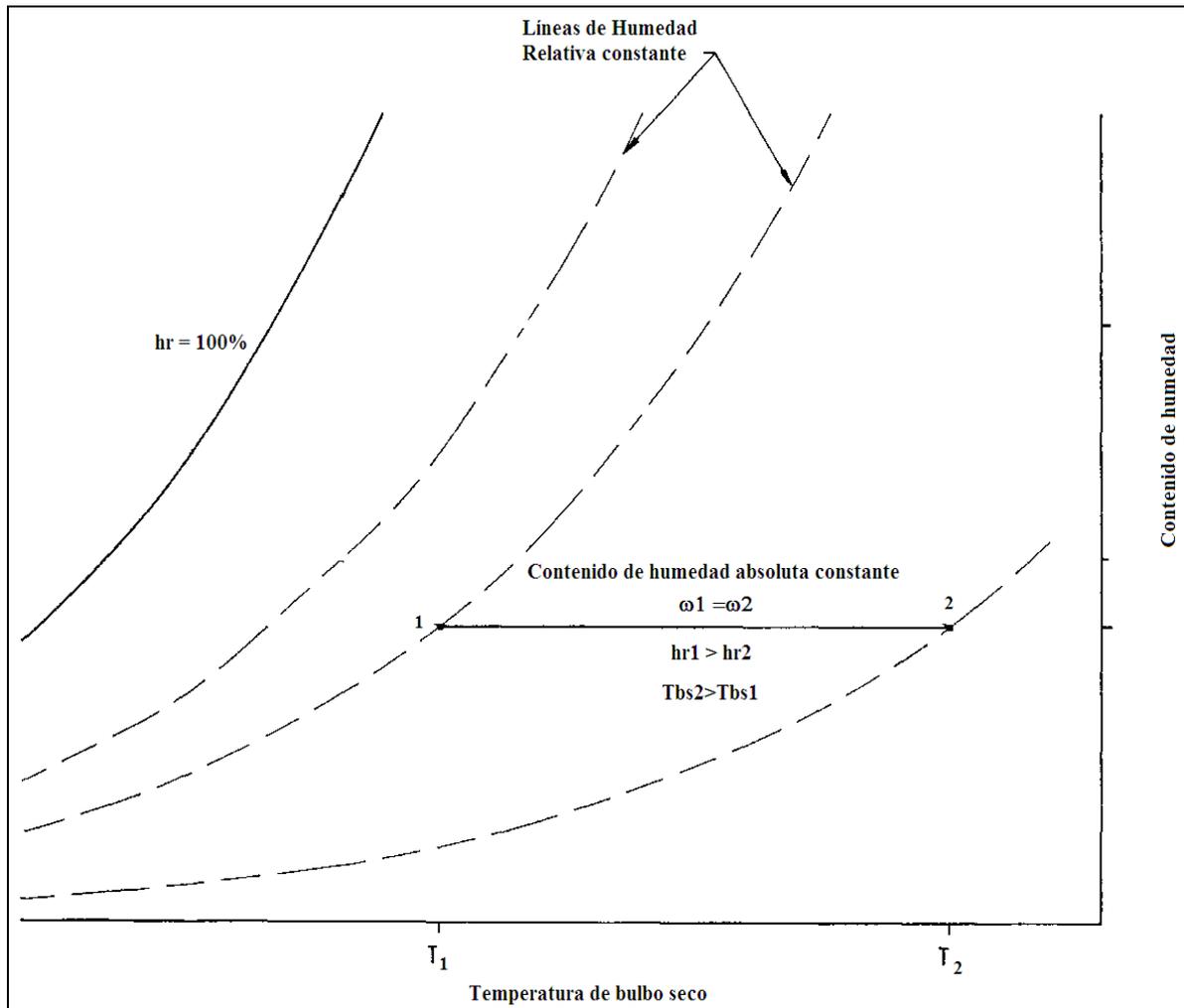


Figura 3. 19. Calentamiento aire, transición Estado 1 – 2.

De acuerdo a la Tabla 3. 3 (conforme al proceso descrito en la Figura 3. 19) se estableció una temperatura del aire de secado de $T_{as2} = 80$ [°C] y el mismo contenido de humedad $\omega_1 = \omega_2 = 0,0072$ [Kg agua/Kg aire]²⁶, mediante la utilización del software para Excel, se calcularon las propiedades psicrométricas del punto 2, que constituyen las condiciones en la cámara del secador después de haber sido calentado por el quemador. Los resultados se presentan en la Tabla 3. 25. y después de realizar las conversiones de unidades los resultados se muestran en la Tabla 3. 26.

²⁶ Véase sección 2.4.1. Condiciones del aire ambiente. Referente a la descripción del proceso de secado.

Tabla 3. 25.Cálculos Psicrométricos - Estado 2

| Cálculos Psicrométricos - Estado 2 | | | | |
|---|---------|---------------------|---------|-----------|
| Entradas | | | | |
| Temperatura bulbo seco | 176,0 | °F | 80,00 | °C |
| Temperatura bulbo húmedo | 78,6 | °F | 25,88 | °C |
| Elevación sobre el nivel del mar | 7.972,4 | Ft. | 2.430,0 | M |
| Salidas | | | | |
| Presión atmosférica | 22,22 | In. Hg | 10,91 | Psi |
| Presión de vapor a la saturación | 13,987 | In. Hg | 6,87 | Psi |
| Presión de vapor | 0,254 | In. Hg | 0,12 | Psi |
| Temperatura de punto de rocío | 40,7 | °F | | |
| Humedad relativa | 1,8 | Percent | | |
| Relación de humedad | 0,0072 | lb/lb | 50,3 | gramos/lb |
| Entalpía | 50,4 | Btu/lb | | |
| Volumen específico | 21,82 | Ft ³ /lb | | |
| Referencia: Autores. | | | | |

Tabla 3. 26.Condiciones aire – Estado 2

| Condiciones aire – Estado 2 | | | | | | |
|------------------------------------|------|----------|--------------------|---------|---------------------|---------|
| Temperatura (bulbo seco) | Tas2 | 80,00 | °C | 176,00 | °F | Punto 2 |
| Temperatura bulbo humedo | Tah2 | 25,88 | | 78,58 | | |
| Humedad relativa | hr2 | 0,0182 | % | 1,82 | % | |
| Razón de humedad | ω2 | 0,0072 | Kg agua/Kg aire | 0,0072 | lb/lb | |
| Volumen específico | va2 | 1,3594 | m ³ /Kg | 21,8205 | ft ³ /lb | |
| Entalpía | ha2 | 117,3069 | KJ/Kg | 50,4329 | BTU/lb | |
| Referencia: Autores. | | | | | | |

Las paredes de la cámara de secado tienen dos capas de mampostería de cemento agregado de arena y en el interior una columna de ladrillo común, tal como se muestra en la Figura 3. 20:

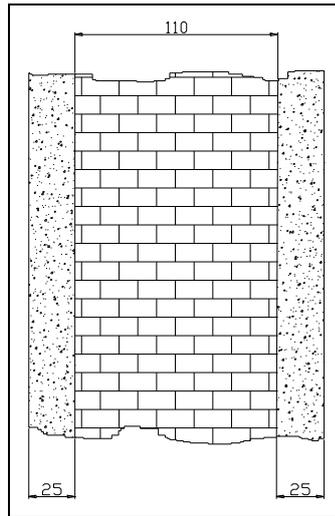


Figura 3. 20. Dimensiones de la pared de la cámara de secado [mm].

Las pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de secado se calcularon a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{\text{Perdido}} = A \times U \times \Delta T \cdot \quad \text{Ecuación 3. 34}$$

Donde:

$A \rightarrow$ Área de la pared [m²]

$U \rightarrow$ Coeficiente global de transferencia de calor [W/m².K]

$\Delta T \rightarrow$ Diferencia de temperaturas entre el interior de la cámara y el aire al exterior [°C].

Además, el coeficiente global de transferencia de calor viene dado por la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{Rt}$$

$$Rt = \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3} + \frac{1}{h_{\text{ext}}} \quad \text{Ecuación 3. 35}$$

Donde:

Rt → Resistencia térmica total a la transferencia de calor [$m^2.K / W$]

h_{int} → Coeficiente de convección al interior de la cámara [$W/m^2.K$]²⁷

$x_{1,3}$ → Espesor de la capa de cemento agregado de arena [m]

x_2 → Espesor de la columna de ladrillo común [m]

$k_{1,3}$ → Conductividad térmica cemento agregado de arena [$W/m^2.K$]

k_2 → Conductividad térmica del ladrillo común [$W/m^2.K$]

h_{ext} → Coeficiente de convección al exterior de la cámara [$W/m^2.K$]

$$h_{int} = 34,1 \left[\frac{W}{m^2.K} \right]$$

$$h_{ext} = 9,4 \left[\frac{W}{m^2.K} \right]$$

$$x_1 = x_3 = 0,025 \text{ [m]}$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = 0,72 \left[\frac{W}{m.K} \right]$$

$$x_2 = 0,11 \text{ [m]}$$

$$Rt = \frac{1}{34,1} + \frac{0,025}{0,72} + \frac{0,11}{0,72} + \frac{0,025}{0,72} + \frac{1}{9,4}$$

$$Rt = 0,36 \left[\frac{m^2.K}{W} \right]$$

$$U = \frac{1}{0,36}$$

$$U = 2,79 \left[\frac{W}{m^2.K} \right]$$

Una vez obtenido el coeficiente global de transferencia de calor (U), se determinaron las áreas de las paredes a través de las cuales se pierde calor A1, A2, AT y se reemplazaron estos valores en la ecuación 3.33 para obtener el calor perdido.

$$A = 2 \times (11,80 \times 0,96) + 2 \times (3,80 \times 0,96) - (0,452 \times 1,24)$$

$$A = 29,39 [m^2]$$

²⁷ Coeficientes de convección tomados del libro de Dossat. Tabla 10-4. Pág 196.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Perdido}} &= A \times U \times \Delta T . \\ \dot{Q}_{\text{Perdido}} &= (29,39)[m^2] \times (2,79)[W/m^2.K] \times (80 - 4,8)[K] \\ \dot{Q}_{\text{Perdido}} &= 6168,43 [W] = 6168,43 [J/s] \\ \dot{Q}_{\text{Perdido}} &= 6,17 [KJ/s] \end{aligned}$$

El resumen de los resultados de aplicar la ec 3.33 se muestra en la Tabla 3. 27:

Tabla 3. 27. Calor perdido.

| Pérdidas de calor | | | |
|--------------------------------------|------------------|----------|-------------------------------|
| Espesor pared | Xt | 0,16 | (m) |
| Espesor enlucido | x1,x3 | 0,05 | |
| Espesor ladrillo común | X2 | 0,11 | |
| Conductividad térmica cemento | k1,k3 | 0,72 | (W/m.K) |
| Conductividad térmica ladrillo | K2 | 0,72 | |
| Coefficiente exterior de convección | h _{ext} | 1,7 | [BTU/h.pie ² . °F] |
| Coefficiente interior de convección | h _{int} | 6,0 | |
| Coefficiente exterior de convección | h _{ext} | 9,4 | [W/m ² .K] |
| Coefficiente interior de convección | h _{int} | 34,1 | |
| Resistencia térmica total | Rt | 0,36 | [m ² .K/W] |
| Coefficiente global de transferencia | U | 2,79 | [W/m ² .K] |
| Área pared 1 | A1 | 11,328 | [m ²] |
| Área pared 2 | A2 | 3,648 | |
| Área total | At | 29,39 | |
| Temperatura exterior | Tas1 | 277,95 | [K] |
| Temperatura interior | Tas2 | 353,15 | |
| Tasa de Calor perdido | Qperdido | 6.168,43 | [J/s] |
| | | 6,17 | [KJ/s] |
| Referencia: Autores. | | | |

Posteriormente se planteó un balance de energía entre los puntos 2 y 3 del proceso (véase Figura 3. 21) con la finalidad de determinar el tiempo de secado y las condiciones de salida del aire en el punto 3.

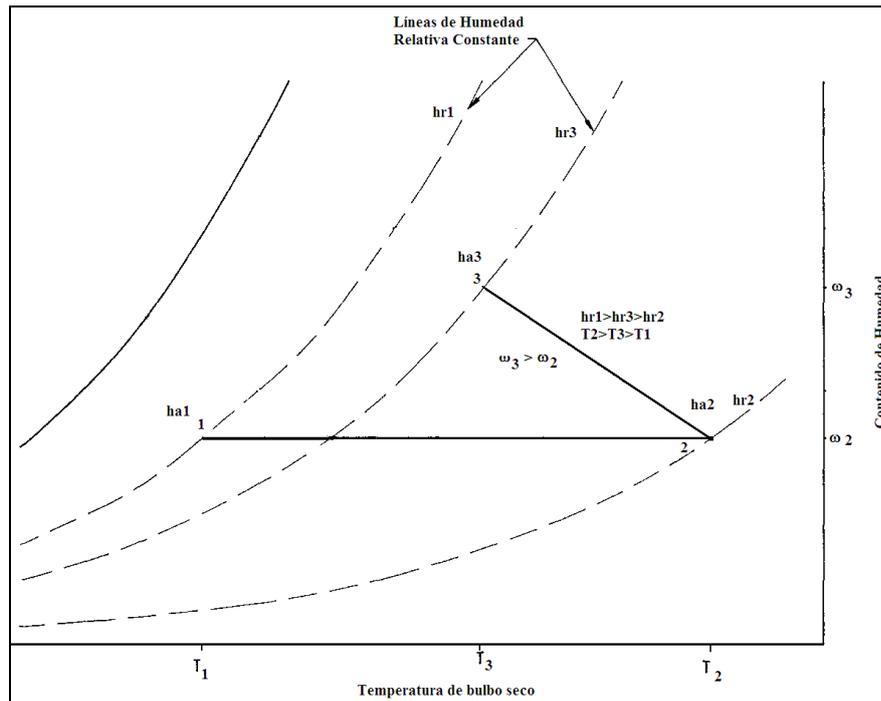


Figura 3. 21. Transferencia calor, secado del grano, transición Estado 2 – 3

*Calor de entrada (aire) = Energía almacenada (agua en el grano) +
Calor de salida (aire) + pérdidas (paredes)*

$$\dot{Q}_{\text{entrada}} = \dot{Q}_{\text{almacenado}} + \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{Q}_{\text{perdido}} \quad \text{Ecuación 3. 36}$$

$$\frac{\dot{m}a_2 \times ha_2}{\nu a_2} = \frac{mw \times h_{fg}}{t} + \frac{\dot{m}a_3 \times ha_3}{\nu a_3} + \dot{Q}_{\text{perdido}} \quad \text{Ecuación 3. 37}$$

donde:

$\dot{m}a_2 \rightarrow$ Flujo de aire en el punto 2 [m³/s]

$\nu a_2 \rightarrow$ Volumen específico del aire en el punto 2 [m³/Kg]

$ha_2 \rightarrow$ Entalpía del aire en el punto 2 [KJ/Kg]

$mw \rightarrow$ Masa de agua por remover del grano [Kg]

$h_{fg} \rightarrow$ Entalpía de vaporización del agua a la temperatura de salida del aire

[KJ/Kg]

$\dot{m}a_3 \rightarrow$ Flujo de aire en el punto 3 [m³/s]

$va_3 \rightarrow$ Volumen específico del aire en el punto 3 [m³/Kg]

$ha_3 \rightarrow$ Entalpía del aire en el punto 3, a las condiciones de salida que se desean

encontrar [KJ/Kg]

$t \rightarrow$ Tiempo estimado de la operación de secado [s]

$\dot{Q}_{perdido} \rightarrow$ Calor perdido [KJ/s]

Los datos conocidos son:

Punto 2:

$$Ta_2 = 80 \text{ [C]}$$

$$\omega_2 = 0,0072 \left[\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire}} \right]$$

$$ha_2 = 117,3069 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$va_2 = 1,3594 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} \right]$$

$$ma_2 = 8 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Punto 3:

$$ma_3 = 8 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$Ta_3 = ?? \text{ [C]}$$

$$ha_3 = ?? \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$va_3 = ?? \left[\frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} \right]$$

Agua:

$$T_w = ?? \text{ [C]}$$

$$h_f = ?? \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$h_g = ?? \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$h_{fg} = h_f - h_g = \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$mw = 2141,57 \text{ [Kg]}$$

$$t = 11,1 \text{ [h]} = 39.960 \text{ [s]}$$

Al reemplazar valores se obtuvo:

$$\frac{\dot{m}a_2 \times ha_2}{va_2} = \frac{mw \times h_{fg}}{t} + \frac{\dot{m}a_3 \times ha_3}{va_3} + \dot{Q}_{perdido}$$

$$\frac{8 \left[\frac{m^3}{s} \right] \times 117,3069 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]}{1,3594 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]} = \frac{2141,57 [Kg] \times h_{fg} \left[\frac{KJ}{Kg} \right]}{t [s]} + \frac{8 \left[\frac{m^3}{s} \right] \times ha_3 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]}{va_3 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]} + 6,1684 \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

En esta ecuación se desconocen la temperatura de bulbo seco final del aire y del grano seco. Se asume que durante el período de secado el aire saldrá del lecho a una temperatura de bulbo húmedo constante, en equilibrio con las capas superiores del grano.

Mediante un proceso iterativo se ingresaron los datos de entalpía de vaporización del agua²⁸, entalpía y volumen específico del aire en el punto 3 (a una temperatura de bulbo húmedo de equilibrio) hasta obtener la igualdad aproximada de la ecuación.

El tiempo constituye la variable segunda variable desconocida, la cual se estableció inicialmente en un rango entre 8 y 12 horas.²⁹

Se realizaron varias aproximaciones para llegar a los siguientes valores:

²⁸ Software TPX de propiedades del H₂O para Excel de David G. Goodwin.

²⁹ El tiempo de secado de cada lote de producto depende de la capacidad del sistema, del volumen y condiciones del producto y de las condiciones ambientales del sitio.

$$t = 9,75 \text{ [h]} = 35100 \text{ [s]}$$

$$Tas_3 = 19,50 \text{ [C]}$$

$$Tah_3 = Tw = 17,0 \text{ [C]}$$

$$h_f = 73,4661 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$h_g = 2533,4976 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$h_{fg} = 2533,4976 - 73,4661$$

$$h_{fg} = 2460,0314 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$Tas_3 = 19,00 \text{ [C]}$$

$$Tah_3 = Tw = 17,50 \text{ [C]}$$

$$ha_3 = 78,4594 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$hr_3 = 0,8782 = 87,82\%$$

$$va_3 = 1,1409 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$$

$$\omega_3 = 0,0164 \left[\frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ aire}} \right]$$

$$\frac{8 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 117,3069 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]}{1,3594 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]} = \frac{2141,57 \left[\frac{Kg}{s} \right] \cdot 2460,0314 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]}{39960 \text{ [s]}} + \frac{8 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 78,4594 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]}{1,1409 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]} + 6,1684 \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

$$690,3669 \left[\frac{KJ}{s} \right] = 131,8398 \left[\frac{KJ}{s} \right] + 550,1408 \left[\frac{KJ}{s} \right] + 6,1684 \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

$$690,3669 \left[\frac{KJ}{s} \right] \cong 688,1491 \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

Los resultados del estado del aire en las condiciones de salida, en el punto 3 se presentan en las Tabla 3. 28 y Tabla 3. 29. Las entalpías de líquido saturado y vapor saturado del agua a la temperatura de bulbo húmedo en el punto 3 se presentan en la Tabla 3. 30.

Tabla 3. 28. Cálculos Psicrométricos - Estado 3

| Cálculos Psicrométricos - Estado 3 | | | | |
|---|---------|---------------------|---------|-----------|
| Entradas | | | | |
| Temperatura bulbo seco | 66,2 | °F | 19,00 | °C |
| Temperatura bulbo húmedo | 63,5 | °F | 17,50 | °C |
| Elevación sobre el nivel del mar | 7.972,4 | Ft. | 2.430,0 | m |
| Salidas | | | | |
| Presión atmosférica | 22,22 | In. Hg | 10,91 | psi |
| Presión de vapor a la saturación | 0,649 | In. Hg | 0,32 | psi |
| Presión de vapor | 0,570 | In. Hg | 0,28 | psi |
| Temperatura de punto de rocío | 62,4 | °F | | |
| Humedad relativa | 87,8 | Percent | | |
| Relación de humedad | 0,0164 | lb/lb | 114,5 | gramos/lb |
| Entalpía | 33,7 | Btu/lb | | |
| Volumen específico | 18,31 | Ft ³ /lb | | |
| Referencia: Autores. | | | | |

Tabla 3. 29. Condiciones aire – Estado 3

| Condiciones aire – Estado 3 | | | | | | |
|------------------------------------|------|---------|----------------------|---------|---------------------|---------|
| Temperatura (bulbo seco) | Tas3 | 19,00 | [°C] | 66,20 | °F | Punto 3 |
| Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | 17,50 | | 63,50 | °F | |
| Humedad relativa | hr3 | 0,8782 | [%] | 87,82 | % | |
| Razón de humedad | ω3 | 0,0164 | [Kg agua/Kg aire] | 0,0164 | lb/lb | |
| Volumen específico | va3 | 1,1409 | [m ³ /Kg] | 18,3144 | ft ³ /lb | |
| Entalpía | ha3 | 78,4594 | [KJ/Kg] | 33,7315 | BTU/lb | |
| Referencia: Autores. | | | | | | |

Tabla 3. 30. Propiedades del agua (entalpía)

| Propiedades del agua | | | | |
|-----------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Temperatura (C) | Calidad (X) | Entalpías | | |
| | | hf | hg | hfg |
| 17,50 | 0 | 73,4661 | | 2460,0314 |
| 17,50 | 1 | | 2533,4976 | |
| Referencia: Autores | | | | |

Los valores obtenidos en el balance de energía se encuentran en la Tabla 3.30:

Tabla 3. 31. Balance térmico.

| Balance térmico | | | | | |
|-------------------------------------|------------|----------|--------|-------|------|
| Flujo aire | ma1,2,3 | 8 | [m³/s] | 28800 | m³/h |
| Tiempo secado | t | 39960 | [s] | 11,1 | h |
| Qentrada | (Ma.h2)/v2 | 690,3669 | [KJ/s] | | |
| Qalmacendo | (mw.hfg)/t | 131,8398 | | | |
| Qsalida | (Ma.h3)/v3 | 550,1408 | | | |
| Pérdidas | Qperdido | 6,1684 | | | |
| Balance (Sumatoria segundo término) | | 688,1491 | | | |
| Referencia: Autores. | | | | | |

La humedad removida del grano [Kg] durante la operación de secado se puede cuantificar al encontrar la diferencia entre los contenidos de humedad del aire en los estados 2 y 3 (antes y después de atravesar el lecho de maíz) para luego multiplicarla por la masa de aire que circuló en el sistema durante el tiempo de operación. Este valor representa la máxima cantidad de agua que puede remover el aire, en las condiciones presentadas, del lote de producto, calculado mediante la expresión 3.38.

$$mw_{\max} = (\omega_3 - \omega_2) \times \frac{\dot{m}a_2}{va_2} \times t \quad [Kg \text{ agua}] \quad \text{Ecuación 3. 38}$$

donde:

$\dot{m}a_2 \rightarrow$ Flujo de aire en el sistema [m³/s]

$va_2 \rightarrow$ Volumen específico del aire en el punto 2 [m³/Kg]

$\omega_2 \rightarrow$ Contenido de humedad en el punto 2 [Kg agua/Kg aire]

$\omega_3 \rightarrow$ Contenido de humedad en el punto 3 [Kg agua/Kg aire]

$t \rightarrow$ Tiempo de operación [Kg agua/Kg aire]

$$mw_{\max} = (0,0154 - 0,0072) \left[\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire}} \right] \times \frac{8 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{1,3594 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{Kg aire}} \right]} \times 35100 \text{ [s]}$$

$$mw_{\max} = 2157,01 \text{ [Kg agua]}$$

Teóricamente, el modelo matemático planteado permitiría la predicción de las condiciones del aire en el estado 3 (a la salida del secador) además de la estimación del tiempo de secado.

Para evaluar la validez teórica del modelo resulta necesario calcular los errores incurridos en el balance de energía y en la masa de agua removida del grano. Ambos errores teóricos (de la ecuación 3.36 y de la masa de agua removida) se calcularon con la ecuación 3.39:

$$Error = \frac{(\text{Valor real} - \text{Valor teórico})}{\text{Valor teórico}} \times 100 \text{ [%]} \quad \text{Ecuación 3. 39}$$

Se reemplazaron los valores de ambos lados de la ecuación 3.38 como sigue:

$$Error_1 = \frac{(690,3669 - 688,1491) \left[\frac{\text{KJ}}{\text{s}} \right]}{690,3669 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{s}} \right]} \times 100$$

$$Error_1 = 0,32 \text{ [%]}$$

$$Error_2 = \frac{(2157,01 - 2141,57) \left[\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg agua}} \right]}{2157,01 \left[\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg agua}} \right]} \times 100$$

$$Error_1 = 0,72 \text{ [%]}$$

En ambos casos los errores son muy pequeños e indican que el valor tomado como teórico es mayor que el valor tomado como real. Adicionalmente, para validar la aproximación de la iteración final al mejor resultado posible, se realizó un sencillo análisis de sensibilidad con el cual se demostró que pequeños cambios en los parámetros (temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire en el estado 3 y del

tiempo de secado) produjeron notables incrementos de los errores calculados, como se muestra en la Tabla 3. 32:

Tabla 3. 32. Errores - Análisis de sensibilidad.

| Errores - Análisis de sensibilidad | | | |
|--|-----------------------|---------|-------------------|
| Condiciones de diseño | | | |
| Temperatura (bulbo seco) | Tas3 | 19,50 | [C] |
| Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | 17,00 | |
| Tiempo secado | t | 9,75 | [h] |
| Qentrada | (Ma.h2)/v2 | 690,37 | [KJ/s] |
| Balance (Sumatoria segundo término) | | 19,00 | |
| Error1 | E1 | 17,50 | [%] |
| Masa agua (por remover) | mw | 0,8782 | [BTU/h] |
| Humedad removida | $\omega_3 - \omega_2$ | 0,0164 | [Kg agua/Kg aire] |
| Capacidad remoción agua | mw_{max} | 1,1409 | [Kg agua] |
| Error2 | E2 | 78,4594 | [%] |
| Variación tiempo de secado | | | |
| Tiempo secado | t | 19,00 | [h] |
| Error1 | E1 | 17,50 | [%] |
| Error2 | E2 | 0,8782 | |
| Tiempo secado | t | 0,0164 | [h] |
| Error1 | E1 | 1,1409 | [%] |
| Error2 | E2 | 78,4594 | |
| Variación temperatura bulbo húmedo estado 3 | | | |
| Temperatura (bulbo seco) | Tas3 | 19,00 | [C] |
| Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | 17,50 | |
| Error1 | E1 | 0,8782 | [%] |
| Error2 | E2 | 0,0164 | |
| Temperatura (bulbo seco) | Tas3 | 1,1409 | [C] |
| Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | 78,4594 | |
| Error1 | E1 | 19,00 | [%] |
| Error2 | E2 | 17,50 | |
| Referencia: Autores | | | |

La aportación de calor necesaria para calentar el aire a las condiciones de diseño se calculó al encontrar la diferencia entre las entalpías del aire en los estados 1 y 2 (desde la temperatura ambiente hasta la temperatura requerida), ecuación 3.40:

$$Flujo \ de \ Calor_{requerido} = (h_2 - h_1) \times \frac{\dot{m}a_1}{va_1} \ [Kg \ agua] \quad \text{Ecuación 3. 40}$$

donde:

$\dot{m}a_1 \rightarrow$ Flujo de aire que requiere calentarse [m^3/s]

$\nu a_2 \rightarrow$ Volumen específico del aire en el punto 1 [m^3/Kg]

$h_1 \rightarrow$ Entalpía específica del en el punto 1 [KJ/Kg]

$h_2 \rightarrow$ Entalpía específica del en el punto 2 [KJ/Kg]

Se reemplazaron los valores de cada variable y se obtuvo:

$$Flujo\ de\ Calor_{requerido} = (117,3069 - 40,7321) \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \times \frac{8 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{1,0699 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]}$$

$$Flujo\ de\ Calor_{requerido} = 572,5732 \left[\frac{KJ}{s} \right] = 2'061.213,53 \left[\frac{KJ}{h} \right] = 1'953665,58 \left[\frac{BTU}{h} \right]$$

El consumo de combustible se calculó a partir del poder calórico del GLP (propano) y del tiempo de trabajo del sistema mediante la Ec. 3.41:

$$cc = \frac{Flujo\ de\ Calor_{requerido} \left[\frac{KJ}{h} \right] \times t \left[h \right]}{PC \left[\frac{KJ}{Tanque} \right]} [Tanques] \quad \text{Ecuación 3. 41}$$

$$PC = 10950,00 \left[\frac{Kcal}{Kg\ gas} \right] \times 4,186 \left[\frac{KJ}{Kcal} \right]$$

$$PC = 45.836,70 \left[\frac{KJ}{Kg\ gas} \right] \times 15 \left[\frac{Kg\ gas}{Tanque} \right]$$

$$PC = 687.550,50 \left[\frac{KJ}{Tanque} \right]$$

$$cc = \frac{2'061.263,53 \left[\frac{KJ}{h} \right] \times 9,75 [h]}{687.550,50 \left[\frac{KJ}{Tanque} \right]} [Tanques]$$

$$cc = 29,23 \cong 30 [Tanques]$$

Así mismo la tasa de consumo del sistema se calculó mediante la Ecuación 3.42:

$$CC = \frac{cc}{t} \left[\frac{\text{Tanques}}{h} \right] \quad \text{Ecuación 3. 42}$$

$$CC = \frac{29,23}{9,75}$$

$$CC = 2,998 \cong 3 \left[\frac{\text{Tanques}}{h} \right]$$

$$CC = 44,97 \cong 45 \left[\frac{\text{Kg gas}}{h} \right]$$

Se puede apreciar que el consumo de combustible es el máximo valor calculado por tratarse de las condiciones de diseño más adversas. Los parámetros de operación son significativamente diferentes para el funcionamiento del mismo secador en el mismo lugar con condiciones ambientales diferentes.

La selección del quemador de gas se realizó a partir de las especificaciones técnicas del fabricante³⁰ para diferentes modelos que se muestran en la Tabla 3. 33:

Tabla 3. 33. Modelos y Capacidades de Quemadores de Gas Mephisto.

| Modelos y Capacidades | | | |
|---------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------|
| Modelo | Combustión | Valor térmico | Cantidad |
| | [Kg Gas/hora] | [BTU/h] | [Un] |
| QG - 1 | 3 12 | 150.000 600.000 | 12 |
| QG - 2 | 8 24 | 400.000 1'200.000 | 24 |
| QG - 3 | 16 48 | 800.000 2'400.000 | 48 |
| Referencia: Catálogo Induhorst. | | | |

La eficiencia de utilización de calor sensible (SHUE) o eficiencia de secado, que mide el grado de utilización del calor sensible en el aire de secado, está definida mediante la siguiente relación Ec. 3.43:

³⁰ Quemadores de Gas Mephisto. Catálogo Induhorst. Quevedo – Ecuador.

$$SHUE = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor disponible para remoción de humedad}} \quad \text{Ecuación 3. 43}$$

$$SHUE = \frac{h_{fg} \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \times mw \left[Kg \right]}{(ha_2 - ha_1) \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \times ma_1 \left[Kg \right]} \times 100$$

$$SHUE = \frac{2460,0314 \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \times 2141,57 \left[Kg \right]}{(76,5748) \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \times 262.453,43 \left[Kg \right]} \times 100$$

$$SHUE = 0,2623 \times 100$$

$$SHUE = 26,23 \quad [\%]$$

La eficiencia de combustible está basada solamente en el calor suministrado por el combustible, definida por la Ec. 3.44

$$\text{Eficiencia de combustible} = \frac{\text{Calor utilizado para remoción de humedad}}{\text{Calor suministrado por el combustible}}$$

Ecuación 3. 44

$$\eta_{comb} = \frac{h_{fg} \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \times mw \left[Kg \right]}{PC \left[\frac{KJ}{Tanque} \right] \times cc \left[Tanques \right]} \times 100$$

$$\eta_{comb} = \frac{2460,0314 \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \times 2141,57 \left[Kg \right]}{(687.550,50) \left[\frac{KJ}{Tanque} \right] \times 30 \left[Tanques \right]} \times 100$$

$$\eta_{comb} = 0,2254 \times 100$$

$$\eta_{comb} = 22,54 \quad [\%]$$

A continuación en la Tabla 3. 34 se presentan los parámetros técnicos del sistema de calentamiento de aire:

Tabla 3. 34 Parámetros técnicos

| Parámetros técnicos | | | |
|---|--------------------------|---------------|-------------------|
| Aportación de calor del aire | Qaportado | 76,5748 | [KJ/Kg] |
| Masa de aire | Ma1 | 262453,43 | [Kg] |
| Aportación total de calor | Qaportado | 20.097.319,46 | [KJ] |
| Potencia (Flujo de Calor requerido) | Qrequerido | 572,5732 | [KJ/s] |
| | | 2.061.263,53 | [KJ/h] |
| | | 1.953.665,58 | [BTU/h] |
| Humedad removida | $\omega_3 - \omega_2$ | 0,0082 | [Kg agua/Kg aire] |
| | $m_{w_{max}}$ | 2158,45 | [Kg agua] |
| Consumo de combustible y eficiencias | | | |
| Poder calórico | PC | 10950,00 | [Kcal/Kg] |
| | | 45836,70 | [KJ/Kg] |
| | | 687.550,50 | [KJ/tanque] |
| Consumo combustible | Cc | 20.097.319,46 | [KJ] |
| | | 29,23 | [tanques] |
| Tasa de consumo de combustible | CC | 2,998 | [tanques/hora] |
| | | 44,97 | [Kg gas/hora] |
| Calor utilizado remoción humedad | Hfg. Mw | 5270849,74 | [KJ] |
| Calor sensible disponible | $(h_2 - h_1) \cdot ma_1$ | 20097319,46 | |
| Calor combustible | Qcomb | 20626515,00 | |
| Eficiencia de secado | SHUE | 26,23% | [%] |
| Eficiencia combustible | | 25,55% | |
| Referencia: Autores. | | | |

Se puede apreciar, el presente caso se refiere a la mínima eficiencia obtenida por tratarse de las condiciones de diseño más adversas posibles. Las eficiencias calculadas podrían ser significativamente diferentes para la operación del mismo secador en el mismo lugar con condiciones ambientales diferentes (véase sección 4.4).

3.3.5. Ventilador

La presión estática del ventilador se puede obtener sumando las pérdidas de carga del sistema. Estas pérdidas se producen por la disminución del aire al pasar por los conductos, ampliaciones, camas, válvulas y principalmente al pasar a través de la capa de producto.

Como se había definido con anterioridad la pérdida de carga es la resistencia que opone el producto al paso del flujo de aire cuando es secado o deshidratado utilizando la corriente de aire de un ventilador. Esta propiedad depende de la velocidad, viscosidad y densidad del aire; y, de la porosidad, tamaño, forma, esfericidad, área superficial y contenido de humedad del grano.

Realizar el estudio de la incidencia de todos estos factores para determinar la pérdida de carga del flujo de aire al atravesar la capa de maíz sale del alcance del presente proyecto. Para el caso de granos y semillas, se han elaborado curvas que permiten calcular la pérdida de presión producida por el grano, factor importante que debe considerarse en la selección de un sistema de secado.

Dada la disponibilidad de datos se consideró mas apropiado realizar un análisis de regresión lineal a partir de la Figura 2. 44 y trabajar con un adecuado factor de seguridad para asegurar que la presión generada por el ventilador es la suficiente para superar las pérdidas totales.

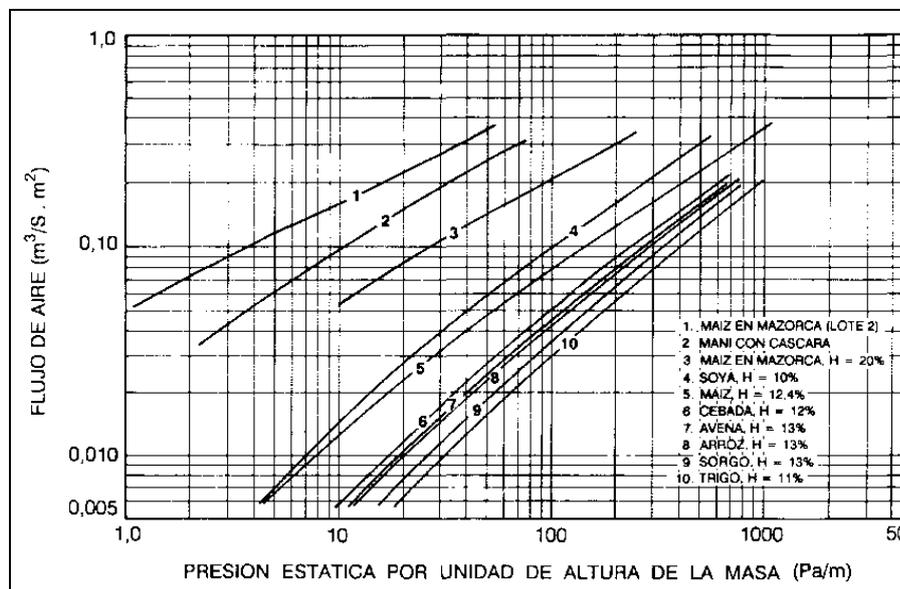


Figura 2. 44. Resistencia de granos y semillas al paso del aire.

Se comenzó reproduciendo la curva de interés de la Figura 2. 44 (maíz con contenido de humedad 12,4%), tomando varios valores distribuidos en todo el rango de

la curva #5 que es la que mejor se ajusta a las características del producto de secado, como se muestra en la Tabla 3. 35 y en la Figura 3. 22:

Tabla 3. 35. Pérdida de presión a través del lecho.

| X | Y |
|----------------------|--------------|
| [Pa/m] | [m/s] |
| 7,0 | 0,009 |
| 8,0 | 0,010 |
| 30,0 | 0,030 |
| 40,0 | 0,040 |
| 70,0 | 0,060 |
| 90,0 | 0,070 |
| 100,0 | 0,080 |
| 400,0 | 0,200 |
| 800,0 | 0,300 |
| Referencia: Autores. | |

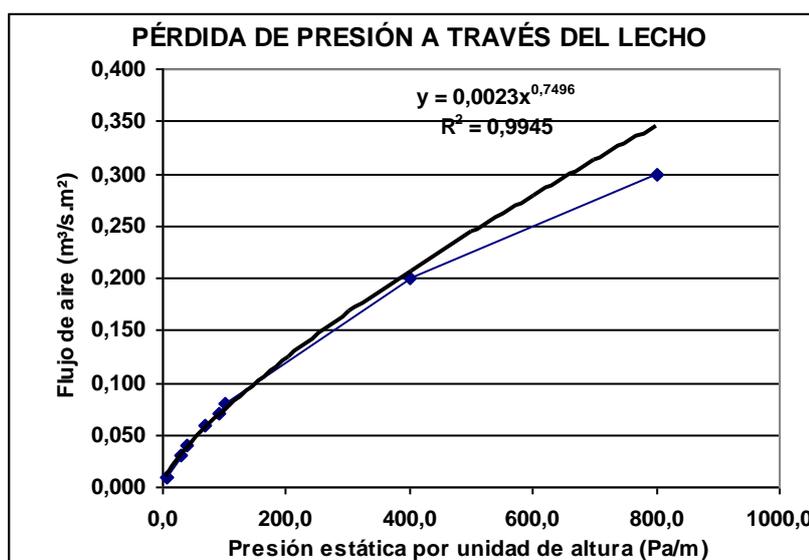


Figura 3. 22. Pérdida de presión a través del lecho.

Como se puede observar, la curva de la pérdida de presión a través del lecho no presenta una tendencia lineal. Para linealizar la curva se la graficó en una escala logarítmica, como se muestra en la Tabla 3. 36 y en la Figura 3. 23.

Tabla 3. 36 Logaritmos de la pérdida de presión en el lecho.

| Log (X) | Log (Y) |
|---------|---------|
| 0,85 | -2,05 |
| 0,90 | -2,00 |
| 1,48 | -1,52 |
| 1,60 | -1,40 |
| 1,85 | -1,22 |
| 1,95 | -1,15 |
| 2,00 | -1,10 |
| 2,60 | -0,70 |
| 2,90 | -0,52 |

Referencia: Autores.

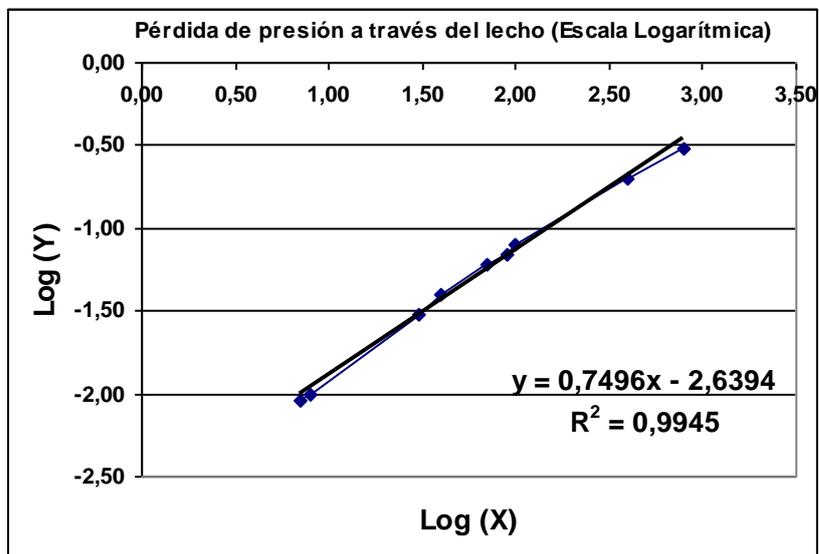


Figura 3. 23. Pérdida de presión a través del lecho (Escala Logarítmica)

De manera análoga, la ecuación exponencial de la curva debe ser linealizada aplicando las propiedades de los logaritmos como se muestra a continuación:

$$Y = a.X^b$$

Ecuación 3. 45

$$\text{Log}(Y) = \text{Log}(a.X^b)$$

$$\text{Log}(Y) = \text{Log}(a) + \text{Log}(X^b)$$

$$\text{Log}(Y) = \text{Log}(a) + b.\text{Log}(X)$$

La ecuación de la recta de mejor ajuste según el método de los mínimos cuadrados queda modificada a la forma:

$$\text{Log}(Y) = \text{Log}(a) + b \cdot \text{Log}(X) \quad \text{Ecuación 3. 46}$$

Cuyos coeficientes se encuentran resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\sum \text{Log}(Y) = n \cdot \text{Log}(a) \pm b \cdot \sum \text{Log}(X) \quad \text{Ecuación 3. 47}$$

$$\sum \text{Log}(X) \cdot \text{Log}(Y) = \text{Log}(a) \sum \text{Log}(X) \pm b \cdot \sum \text{Log}(X)^2 \quad \text{Ecuación 3. 48}$$

Se reemplazaron valores y se obtuvo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-11,66 = 9 \cdot \text{Log}(a) + 16,13 \cdot b$$

$$-18,07 = 16,13 \cdot \text{Log}(a) + 32,70 \cdot b$$

La solución del sistema de ecuaciones arrojó los siguientes resultados:

$$\text{Log}(a) = -2,6394$$

$$a = 10^{-2,6394}$$

$$a = 0,0023$$

$$b = 0,7496$$

Se reemplazaron los valores en la ecuación de regresión y obtuvimos:

$$\text{Log}(Y) = -2,6394 + 0,7496 \cdot \text{Log}(X)$$

Para conocer la utilidad de este modelo es necesario calcular el coeficiente de determinación mediante la ecuación:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2} \quad \text{Ecuación 3. 49}$$

$$r^2 = 1 - \frac{0,0118}{2,1388}$$

$$r^2 = 0,9945$$

Tabla 3. 37. Análisis de regresión lineal de la pérdida de presión a través del lecho (escala logarítmica).

| Análisis de regresión lineal de la pérdida de presión a través del lecho (escala logarítmica) | | | | | | |
|--|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| Log (X) | Log (Y) | X.Y | X² | Y | (y-y)2 | (Y-Y)2 |
| 0,85 | -2,05 | -1,7289 | 0,7142 | -2,0059 | 0,0016 | 0,5625 |
| 0,90 | -2,00 | -1,8062 | 0,8156 | -1,9625 | 0,0014 | 0,4959 |
| 1,48 | -1,52 | -2,2495 | 2,1819 | -1,5321 | 0,0001 | 0,0516 |
| 1,60 | -1,40 | -2,2396 | 2,5666 | -1,4385 | 0,0016 | 0,0104 |
| 1,85 | -1,22 | -2,2544 | 3,4044 | -1,2563 | 0,0012 | 0,0055 |
| 1,95 | -1,15 | -2,2570 | 3,8191 | -1,1745 | 0,0004 | 0,0198 |
| 2,00 | -1,10 | -2,1938 | 4,0000 | -1,1402 | 0,0019 | 0,0396 |
| 2,60 | -0,70 | -1,8188 | 6,7707 | -0,6889 | 0,0001 | 0,3562 |
| 2,90 | -0,52 | -1,5180 | 8,4279 | -0,4632 | 0,0036 | 0,5974 |
| $\Sigma = 16,132$ | $\Sigma = -11,662$ | $\Sigma = -18,0660$ | $\Sigma = 32,7003$ | $\Sigma = -11,6621$ | $\Sigma = 0,0118$ | $\Sigma = 2,1388$ |
| Referencia: Autores. | | | | | | |

Lo que indica que el modelo matemático encontrado explica el 99,45% de las variaciones en la variable dependiente mediante cambios en la variable independiente, lo que para nosotros es aceptable. El modelo matemático es:

$$Y = 0,0023.X^{0,7496}$$

$$r^2 = 0,9945$$

De acuerdo al análisis expuesto, se reemplazaron las condiciones de la pérdida de presión a través del lecho para obtener la velocidad del flujo de aire al atravesar el producto (0,18 m/s) y se obtuvo lo siguiente:

Tabla 3. 38. Cabeza de pérdida de presión h_{lt} a 0,18 m/s

| h_{lt} a 0,18 m/s | |
|---------------------------------------|--------------|
| $Y = 0,0023 \cdot X^{0,7496}$ | |
| $r^2 = 0,9945$ | |
| X | Y |
| (Pa/m) | (m/s) |
| 1000 | 0,41 |
| 2000 | 0,68 |
| 325 | 0,18 |
| Referencia: Autores. | |

Se determinó que la pérdida de presión a través del lecho es de 325 [Pa] por cada 1 [m] de espesor de la capa de maíz.³¹ Es oportuno resaltar que la curva a partir de la cual se obtuvo este resultado se refiere a grano de maíz con diferentes condiciones de suciedad, forma, tamaño, porosidad y contenido de humedad, por lo cual, es aconsejable modificar este valor con un factor de seguridad. El resumen de las pérdidas de presión a través de la campana difusora, de la cámara de secado y del lecho de maíz se presentan en la Tabla 3. 39:

³¹ NOTA: a) Estos valores rigen para producto sin compactar, limpio y seco. Con granos limpios, sin compactar, con alto contenido de humedad (en equilibrio con humedad relativa superior a 85%), se usa sólo 30% de la pérdida de presión indicada para una tasa dada de flujo de aire. b) La compactación del grano en el silo puede causar 50% más de resistencia sobre los valores señalados. c) Cuando hay materias extrañas mezcladas con el grano, no hay recomendación específica para correcciones. La resistencia al flujo del aire aumenta si la materia extraña es de menor tamaño que el grano y disminuye si la materia extraña es mayor que el grano.

Tabla 3. 39. Pérdidas de Presión totales a través del sistema.

| Pérdidas de presión totales a través del sistema. | | | |
|--|------------|---------|------------|
| Dilatación gradual. Secciones 1 – 2 | h_{L1} | 1,4987 | [Pa] |
| Estrangulamiento gradual. Secciones 1 – 2 | h_{L2} | 4,4962 | |
| Dilatación súbita. Secciones 2 – 3 | h_{L3} | 5,9950 | |
| Dilatación súbita. Secciones 3 – 4 | h_{L4} | 0,5130 | |
| Pérdidas totales | h_{L1-4} | 12,5029 | [Pa] |
| Pérdida a través del lecho | h_{L5} | 243,75 | |
| Pérdida total | h_{LT} | 256,25 | [Pa] |
| | | 1,03 | [" c.d.a.] |

Referencia: Autores.

El fabricante proporciona la curva relaciones entre caudal y presión de varios modelos de ventiladores Figura 3. 24, (véase), y curvas de rendimiento de varios modelos BP de ventiladores, (véase Anexo A6), como se muestra en la Figura 3. 25

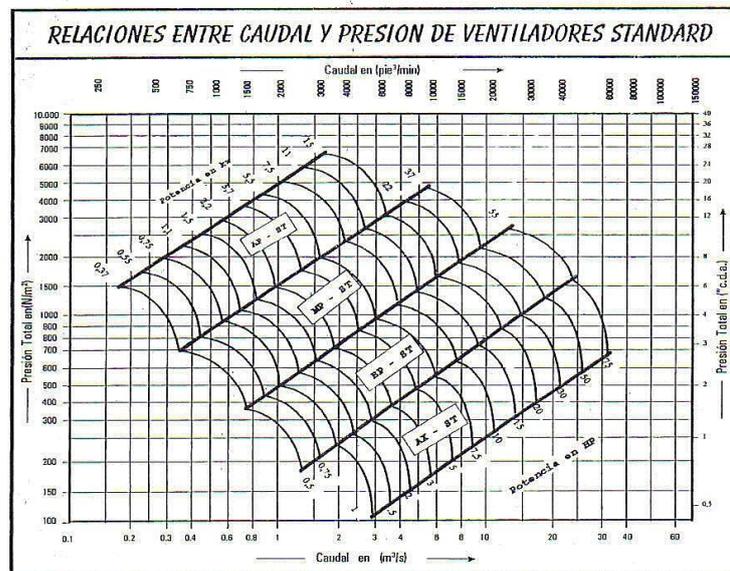


Figura 3. 24. Curvas de Rendimiento de varios modelos de Ventiladores BP - AL con Campana Difusora.

Otro factor importante en la selección del ventilador es que la presión que éste genera no solo debe ser suficiente para superar las pérdidas totales sino que debe

proveer una velocidad de flujo de aire que permita la remoción de humedad a una tasa adecuada.

En la sección anterior se determinó que el caudal de aire requerido para la operación de secado, entre los modelos disponibles es 8,0 [m³/s] correspondiente al modelo BP – AL 11.

Tabla 3. 40.Especificaciones Técnicas Ventiladores BP.

| Especificaciones Técnicas Ventiladores BP | | | | |
|--|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| MODELO | BP - AL 7.5 | BP - AL 11 | BP - AL 15 | Dimensiones |
| Caudal de operación | 5,6 | 17,5 | 8,4 | [m ³ /s] |
| | 11.865,73 | 37.080,40 | 17.798,59 | [cfm] |
| Presión de operación | 1100,00 | 1100,00 | 1100,00 | [Pa] |
| | 4,42 | 4,42 | 4,42 | [" c.d.a] |
| Potencia Nominal | 10 | 15 | 20 | [HP] |
| | 7 | 11 | 15 | [KW] |
| Velocidad Motor | 1750 | 1750 | 1750 | [RPM] |
| Velocidad Rotor (Ventilador) | 1954,79 | 1666,67 | 1385,71 | [RPM] |
| Diámetro polea Motor | 210 | 200 | 194 | [mm] |
| Diámetro polea Rotor | 188 | 210 | 245 | [mm] |
| Construido en chapa metálica de 3 [mm] | | | | |
| Polea doble canal Tipo B | | | | |
| 2 Bandas doble canal Tipo B | | | | |
| DIMENSIONES: | | | | |
| Largo | 1213 | 1386 | 1632 | [mm] |
| Ancho | 986 | 1126 | 1267 | [mm] |
| Altura | 1009 | 1207 | 1407 | [mm] |
| Referencia: Catálogo Induhorst.. | | | | |

En la Figura 3. 25 se presentan las curvas de rendimiento de varios ventiladores de la serie BP – AL con campana difusora:

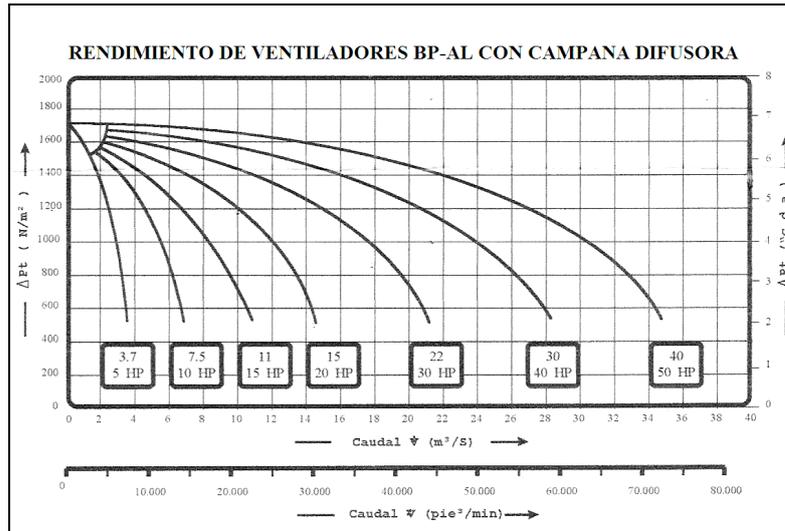


Figura 3. 25. Curvas de Rendimiento de Ventiladores BP - AL con Campana Difusora.

3.3.6. Motor

En la sección anterior se estableció la utilización de un ventilador centrífugo cuyo diseño comúnmente incluye un motor eléctrico como fuente de movimiento, en este caso de potencia 15 [HP].

Table 1. Service factor "K_d"

| Type of duty | Driven machine | Driving unit | | | | | |
|--------------|--|---|-------------------------|---|---------------------------------------|-------|------|
| | | AC motors: normal torque, single-phase and three-phase. Starting torque approx 150% of full load. | DC motors: shunt wound. | AC motors: high torque, squirrel-cage, single- and three-phase, series wound and slip ring. Starting torque approx 200-250% of full load. | DC motors: series and compound wound. | | |
| Light | Agitators for liquids. Blowers and exhausters - small Centrifugal pumps and compressors Fans up to 7.5 kW Light duty conveyors | Internal combustion engines: multi-cylinder over 600 rev/min. | | Internal combustion engines: single- and multi-cylinder under 600 rev/min. Line shafts | | | |
| | | Operational hours per day (h/d) | | Operational hours per day (h/d) | | | |
| | | < 10 | 10-16 | > 16 | < 10 | 10-16 | > 16 |
| Normal | Belt conveyors for sand, grain, etc. Bough mixers Fans over 7.5 kW Generators Line shafts Laundry machinery Marine tools Punches, presses and shears Printing machinery Positive displacement rotary pumps Vibrating and revolving screens | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.3 | 1.4 |
| Heavy | Roll machinery Bucket elevators Reciprocating compressors Conveyors (drag/pancake) Hammer mills Papermill beaters Reciprocating pumps Positive displacement blowers Pulverizers Sawmill and woodworking machinery Textile machinery | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 1.6 |
| Extra heavy | Crushers Mills (ball and rod) Heavy belted Mills, rollers, etc. for the rubber and plastic industries | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 1.6 | 1.8 |

Table 2. Increments for service factor "K_d"

The classification of the nature of the load for the various duties are conditions. The service factor may often have to be increased when the duty is affected by special factors such as:

| | | | |
|---------------------------------|------|---|---------|
| Filter roller | ±0 | Temperature | ±0 |
| on slack side of belt (inside) | +0.1 | up to 60°C | +0.1 |
| on slack side of belt (outside) | +0.1 | 60°C - 73°C | +0.1 |
| on tight side of belt (inside) | +0.2 | Speed-increasing ratios | +0.1 |
| on tight side of belt (outside) | +0.1 | Humid conditions | +0.1 if |
| excessive quantities of oil | +0.1 | Water and liquids that do not damage rubber or fabric | +0.1 if |
| sand, gravel, dirt | +0.1 | Alkali - consult technical department | |
| | | Acids - consult technical department | |

Figura 3. 26. Factor de servicio (Bandas) (Table 1)

Para la selección del tipo de banda y del número de bandas se determinó el factor de servicio a partir de la Figura 3. 26 (véase Anexo A7). Se consideró que la unidad conductora (motor de combustión interna EC multicilindro sobre las 600 rpm) tiene un régimen de trabajo normal (ventiladores sobre 7.4 KW de potencia), trabajando menos de 10 h por día. $F_s = 1,1$.

Con este valor se calculó la potencia de diseño (PD) a partir de la ecuación 3.49:

$$PD = P_{motor} \times FS \quad \text{Ecuación 3. 50}$$

$$PD = 11,19 \times 1,1 \quad [KW]$$

$$PD = 12,30 \quad [KW]$$

Conocida la potencia de diseño y la velocidad de operación del motor (1750 rpm) se determinó el tipo de banda a partir de la Figura 3. 27:

Table 3. Selection of belt cross-section
on the basis of design power and speed of small pulley

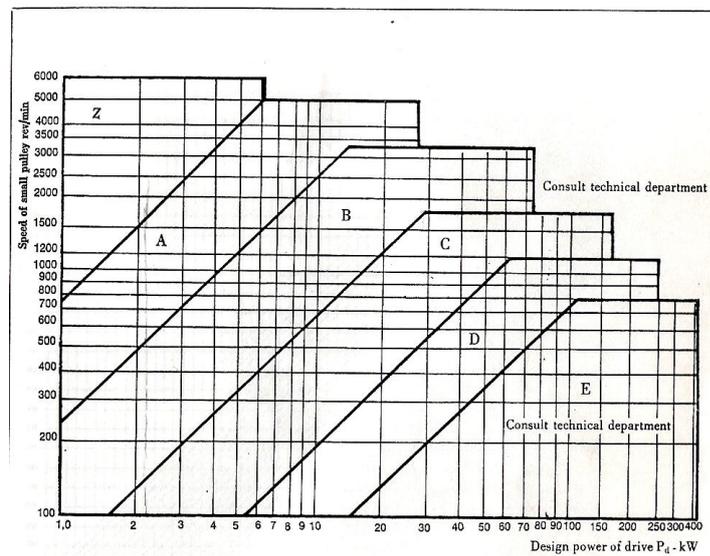


Figura 3. 27. Selección Tipo de banda

Se determinó que la banda a utilizarse de acuerdo a los parámetros de operación de la Figura anterior es Tipo B.

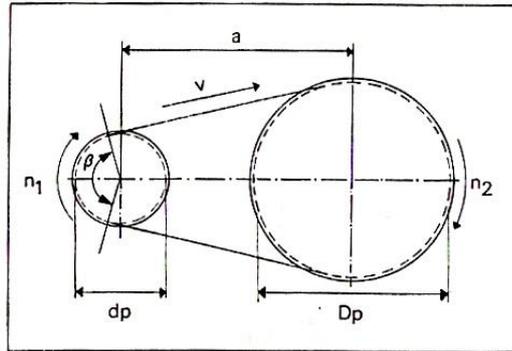


Figura 3. 28. Principales dimensiones poleas

Conocidos los diámetros recomendados de la polea del motor y del ventilador (véase Figura 3. 28) se calculó la relación de transmisión (véase Anexo A. 9) a partir de la ecuación 3.50:

$$n = \frac{Dp_{\text{ventilador}}}{dp_{\text{motor}}} \quad \text{Ecuación 3. 51}$$

$$Dp_{\text{ventilador}} = 210 \text{ [mm]}$$

$$dp_{\text{motor}} = 200 \text{ [mm]}$$

$$n = \frac{Dp_{\text{ventilador}}}{dp_{\text{motor}}}$$

$$n = \frac{210}{200}$$

$$n = 1,05$$

Se calculó la velocidad lineal de la banda a partir de la ecuación 3.51:

$$V_{\text{banda}} = \omega_{\text{motor}} \times \frac{dp_{\text{motor}}}{2} \text{ [m/s]} \quad \text{Ecuación 3. 52}$$

$$V_{banda} = 1750 [rpm] \times \frac{2\pi}{60} \times \frac{200}{2} [mm] \times \frac{1 [m]}{1000 [mm]}$$

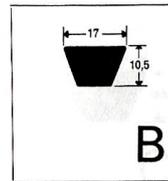
$$V_{banda} = 18,33 \left[\frac{m}{s} \right]$$

La capacidad de transmisión de potencia del tipo de banda seleccionada se obtuvo a partir de la Figura 3. 29 (Véase Anexo A. 10) con la velocidad de operación y el diámetro de la polea más pequeña.

Table 11. Section B

Power per belt kW (Basic power)

| Rev/min of small pulley | Pitch diameter of small pulley, d_p , mm | | | | | | | | | |
|-------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| | 118 | 125 | 132 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 and over |
| 720 | 1.42 | 1.63 | 1.83 | 2.01 | 2.23 | 2.51 | 2.75 | 2.99 | 3.23 | 3.48 |
| 960 | 1.81 | 2.06 | 2.27 | 2.53 | 2.84 | 3.16 | 3.46 | 3.75 | 4.07 | 4.34 |
| 1440 | 2.38 | 2.72 | 3.08 | 3.43 | 3.85 | 4.31 | 4.69 | 5.14 | 5.51 | 5.95 |
| 2880 | 3.39 | 3.99 | 4.47 | 5.01 | 5.58 | 6.14 | 6.68 | 7.09 | 7.47 | |
| 200 | 0.52 | 0.58 | 0.64 | 0.70 | 0.79 | 0.87 | 0.95 | 1.03 | 1.11 | 1.19 |
| 400 | 0.91 | 1.02 | 1.13 | 1.25 | 1.40 | 1.56 | 1.71 | 1.86 | 2.00 | 2.16 |
| 600 | 1.25 | 1.41 | 1.56 | 1.74 | 1.96 | 2.18 | 2.40 | 2.61 | 2.83 | 3.04 |
| 800 | 1.56 | 1.76 | 1.96 | 2.19 | 2.48 | 2.76 | 3.04 | 3.31 | 3.58 | 3.86 |
| 1000 | 1.84 | 2.09 | 2.33 | 2.61 | 2.95 | 3.29 | 3.63 | 3.96 | 4.28 | 4.61 |
| 1200 | 2.10 | 2.39 | 2.67 | 3.00 | 3.39 | 3.79 | 4.17 | 4.55 | 4.93 | 5.30 |
| 1400 | 2.34 | 2.66 | 2.99 | 3.35 | 3.80 | 4.24 | 4.67 | 5.10 | 5.51 | 5.92 |
| 1600 | 2.55 | 2.92 | 3.27 | 3.68 | 4.17 | 4.65 | 5.13 | 5.59 | 6.04 | 6.47 |
| 1800 | 2.75 | 3.14 | 3.53 | 3.97 | 4.50 | 5.02 | 5.53 | 6.02 | 6.49 | 6.95 |
| 2000 | 2.92 | 3.35 | 3.76 | 4.23 | 4.80 | 5.35 | 5.88 | 6.39 | 6.88 | 7.35 |
| 2200 | 3.07 | 3.52 | 3.96 | 4.45 | 5.05 | 5.62 | 6.17 | 6.69 | 7.18 | 7.65 |
| 2400 | 3.19 | 3.67 | 4.13 | 4.64 | 5.28 | 5.84 | 6.40 | 6.92 | 7.41 | 7.86 |
| 2600 | 3.29 | 3.79 | 4.27 | 4.79 | 5.42 | 6.01 | 6.57 | 7.08 | 7.55 | 7.98 |
| 2800 | 3.37 | 3.88 | 4.37 | 4.90 | 5.54 | 6.12 | 6.66 | 7.15 | 7.59 | 7.98 |
| 3000 | 3.42 | 3.94 | 4.43 | 4.97 | 5.60 | 6.17 | 6.69 | 7.15 | 7.54 | |
| 3200 | 3.45 | 3.96 | 4.46 | 5.00 | 5.61 | 6.16 | 6.64 | 7.05 | | |
| 3400 | 3.42 | 3.95 | 4.45 | 4.97 | 5.56 | 6.07 | 6.51 | | | |
| 3600 | 3.38 | 3.91 | 4.39 | 4.90 | 5.45 | 5.92 | | | | |
| 3800 | 3.31 | 3.82 | 4.29 | 4.77 | 5.28 | | | | | |
| 4000 | 3.20 | 3.70 | 4.15 | 4.59 | | | | | | |
| 4200 | 3.06 | 3.54 | 3.96 | | | | | | | |
| 4400 | 2.89 | 3.33 | | | | | | | | |
| 4600 | 2.67 | 3.09 | | | | | | | | |
| 4800 | 2.41 | | | | | | | | | |



Belt speeds over 30 m/s.
The pulleys should be dynamically balanced.

Additional power

| Rev/min of small pulley | Additional power per belt kW for various transmission ratios | | | | | | | | | |
|-------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|
| | 1.00 | 1.02 | 1.05 | 1.09 | 1.13 | 1.19 | 1.25 | 1.35 | 1.52 | 2.00 and over |
| 720 | 0.00 | 0.03 | 0.05 | 0.08 | 0.10 | 0.13 | 0.15 | 0.16 | 0.20 | 0.23 |
| 960 | 0.00 | 0.03 | 0.07 | 0.10 | 0.14 | 0.17 | 0.20 | 0.24 | 0.27 | 0.30 |
| 1440 | 0.00 | 0.05 | 0.12 | 0.17 | 0.22 | 0.27 | 0.33 | 0.38 | 0.43 | 0.49 |
| 2880 | 0.00 | 0.11 | 0.21 | 0.31 | 0.42 | 0.55 | 0.66 | 0.79 | 0.87 | 0.98 |
| 200 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 400 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.09 | 0.11 | 0.12 |
| 600 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.05 | 0.07 | 0.09 | 0.11 | 0.14 | 0.16 | 0.20 |
| 800 | 0.00 | 0.03 | 0.06 | 0.09 | 0.12 | 0.15 | 0.18 | 0.21 | 0.24 | 0.27 |
| 1000 | 0.00 | 0.04 | 0.08 | 0.11 | 0.15 | 0.19 | 0.23 | 0.28 | 0.30 | 0.34 |
| 1200 | 0.00 | 0.05 | 0.09 | 0.14 | 0.18 | 0.23 | 0.27 | 0.32 | 0.36 | 0.41 |
| 1400 | 0.00 | 0.05 | 0.11 | 0.16 | 0.21 | 0.26 | 0.32 | 0.37 | 0.42 | 0.48 |
| 1600 | 0.00 | 0.06 | 0.12 | 0.18 | 0.24 | 0.30 | 0.36 | 0.42 | 0.48 | 0.54 |
| 1800 | 0.00 | 0.07 | 0.14 | 0.20 | 0.27 | 0.34 | 0.41 | 0.48 | 0.54 | 0.61 |
| 2000 | 0.00 | 0.08 | 0.15 | 0.23 | 0.30 | 0.38 | 0.45 | 0.53 | 0.61 | 0.68 |
| 2200 | 0.00 | 0.08 | 0.17 | 0.25 | 0.33 | 0.42 | 0.50 | 0.58 | 0.67 | 0.75 |
| 2400 | 0.00 | 0.09 | 0.18 | 0.27 | 0.36 | 0.45 | 0.54 | 0.64 | 0.73 | 0.82 |
| 2600 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.29 | 0.39 | 0.49 | 0.59 | 0.69 | 0.79 | 0.89 |
| 2800 | 0.00 | 0.11 | 0.21 | 0.31 | 0.42 | 0.53 | 0.64 | 0.74 | 0.85 | 0.95 |
| 3000 | 0.00 | 0.11 | 0.23 | 0.34 | 0.45 | 0.57 | 0.68 | 0.79 | 0.91 | 1.02 |
| 3200 | 0.00 | 0.12 | 0.24 | 0.36 | 0.48 | 0.61 | 0.73 | 0.84 | 0.97 | 1.09 |
| 3400 | 0.00 | 0.13 | 0.26 | 0.39 | 0.51 | 0.64 | 0.77 | 0.90 | 1.03 | 1.16 |
| 3600 | 0.00 | 0.14 | 0.27 | 0.41 | 0.54 | 0.68 | 0.82 | 0.95 | 1.09 | 1.23 |
| 3800 | 0.00 | 0.14 | 0.29 | 0.43 | 0.57 | 0.72 | 0.86 | 1.00 | 1.15 | 1.29 |
| 4000 | 0.00 | 0.15 | 0.30 | 0.45 | 0.61 | 0.76 | 0.91 | 1.06 | 1.21 | 1.36 |
| 4200 | 0.00 | 0.16 | 0.32 | 0.48 | 0.64 | 0.79 | 0.95 | 1.11 | 1.27 | 1.43 |
| 4400 | 0.00 | 0.17 | 0.33 | 0.50 | 0.67 | 0.83 | 1.00 | 1.16 | 1.33 | 1.50 |
| 4600 | 0.00 | 0.17 | 0.35 | 0.52 | 0.70 | 0.87 | 1.04 | 1.22 | 1.39 | 1.57 |
| 4800 | 0.00 | 0.18 | 0.36 | 0.54 | 0.73 | 0.91 | 1.09 | 1.27 | 1.45 | 1.63 |

Figura 3. 29. Potencia por banda.

Se realizaron las interpolaciones necesarias y se obtuvo una $P_z = 6,97$ [KW].

La distancia entre centros mínima se calcula a partir de la Ec. 3. 52:

$$C_{\min} = \frac{D_p + 3.d_p}{2}$$

Ecuación 3. 53

$$C_{\min} = \frac{210 + 3 \cdot (200)}{2}$$

$$C_{\min} = 405 \quad [mm]$$

Con la distancia mínima entre centros y con los diámetros de las poleas se calculó la longitud de banda a partir de la ecuación.3.53:

$$Lp = 2 \cdot C_{\min} + \frac{\pi}{2} (Dp + dp) + \frac{(Dp - dp)^2}{4 \cdot C_{\min}} \quad \text{Ecuación 3. 54}$$

$$Lp = 2 \cdot (405) + \frac{\pi}{2} (210 + 200) + \frac{(210 - 200)^2}{4 \cdot (405)}$$

$$Lp = 1.454,09 \quad [mm]$$

Se obtuvo de la Figura 3. 30 (Anexo A. 12) una longitud de banda estándar correspondiente a un número de banda del tipo seleccionado.

Standard lengths for HP-E V-belts

The Trelleborg standard range includes all British Standard lengths. The length tolerances for each belt are in accordance with BSS.1440-1971.

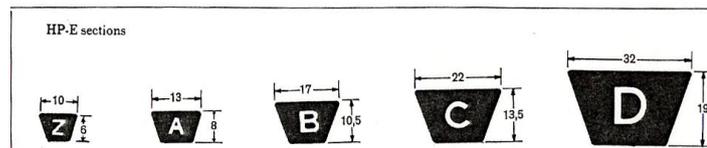


Fig. 4

| Belt No. | Pitch length mm. | | | | Belt No. | Pitch length mm. | | | |
|----------|------------------|------|------|------|----------|------------------|------|------|------|
| | Z | A | B | C | | Z | A | B | C |
| 15 | 405 | — | — | — | 50 | — | 1300 | 1310 | — |
| 16 | 430 | — | — | — | 51 | 1330 | 1330 | 1340 | 1350 |
| 17 | — | — | — | — | 52 | — | 1360 | 1370 | — |
| 18 | 475 | — | — | — | 53 | — | 1380 | 1390 | — |
| 19 | — | — | — | — | 54 | — | 1410 | 1410 | — |
| 20 | 530 | 540 | — | — | 55 | 1420 | 1430 | 1440 | 1450 |
| 21 | — | 570 | — | — | 56 | — | 1460 | 1460 | 1480 |
| 22 | 580 | 590 | — | — | 57 | — | 1480 | 1490 | — |
| 23 | — | 620 | — | — | 58 | — | 1510 | 1510 | — |
| 24 | 625 | 640 | 650 | — | 59 | — | 1530 | 1540 | — |
| 25 | 655 | 670 | — | — | 60 | 1540 | 1550 | 1560 | 1580 |
| 26 | 700 | 700 | — | — | 61 | — | 1590 | 1590 | — |
| 27 | — | 720 | 726 | — | 62 | — | 1610 | 1620 | — |
| 28 | 735 | 740 | 750 | — | 63 | — | 1640 | 1640 | — |
| 29 | — | 770 | — | — | 64 | — | 1660 | 1670 | — |
| 30 | 780 | 790 | 800 | — | 65 | — | 1690 | 1690 | 1700 |
| 31 | — | 820 | 830 | — | 66 | — | 1710 | 1720 | — |
| 32 | 840 | 850 | 860 | — | 67 | — | 1740 | 1740 | — |
| 33 | 855 | 870 | 880 | — | 68 | — | 1760 | 1760 | 1780 |
| 34 | — | 890 | 910 | — | 69 | — | 1790 | 1800 | — |
| 35 | 920 | 920 | 930 | — | 70 | — | 1810 | 1820 | 1830 |
| 36 | 935 | 950 | 950 | — | 71 | 1825 | 1840 | 1850 | 1860 |
| 37 | — | 970 | 980 | — | 72 | — | 1860 | 1870 | 1880 |
| 38 | 995 | 990 | 1000 | — | 73 | — | 1890 | 1900 | — |
| 39 | — | 1020 | 1030 | — | 74 | — | 1920 | 1920 | — |
| 40 | — | 1050 | 1060 | — | 75 | — | 1940 | 1950 | 1950 |
| 41 | 1060 | 1070 | 1080 | — | 76 | — | 1960 | 1970 | 1990 |
| 42 | 1080 | 1100 | 1100 | — | 77 | — | 1990 | 2000 | 2010 |
| 43 | — | 1130 | 1130 | — | 78 | — | 2020 | 2020 | 2040 |
| 44 | — | 1150 | 1160 | — | 79 | — | 2050 | 2050 | — |
| 45 | — | 1180 | 1180 | — | 80 | — | 2070 | 2070 | 2090 |
| 46 | — | 1200 | 1210 | — | 81 | — | 2090 | 2100 | 2110 |
| 47 | — | 1230 | 1240 | — | 82 | — | 2120 | 2130 | 2140 |
| 48 | — | 1250 | 1250 | 1275 | 83 | — | 2140 | 2150 | 2170 |
| 49 | — | 1280 | 1290 | — | 84 | — | 2170 | 2180 | — |

Standard lengths (cont'd)

| Belt No. | Pitch length mm. | | | | Belt No. | Pitch length mm. | | | |
|----------|------------------|------|------|------|----------|------------------|------|------|-------|
| | A | B | C | D | | A | B | C | D |
| 85 | 2200 | 2200 | 2200 | | 136 | 3490 | 3500 | 3520 | |
| 86 | 2220 | 2230 | — | | 138 | — | 3550 | 3565 | 3530 |
| 87 | 2240 | 2250 | — | | 140 | 3590 | 3600 | — | |
| 88 | 2270 | 2280 | — | | 144 | 3690 | 3700 | 3710 | 3730 |
| 89 | 2300 | 2300 | — | | 148 | — | 3790 | — | |
| 90 | 2320 | 2330 | 2340 | | 150 | — | 3850 | 3870 | 3885 |
| 91 | 2350 | 2350 | — | | 154 | 3940 | 3950 | 3970 | 4000 |
| 92 | 2370 | 2380 | 2400 | | 158 | 4040 | 4050 | 4060 | |
| 93 | 2400 | 2400 | 2420 | | 162 | 4140 | 4160 | 4170 | 4190 |
| 94 | 2420 | 2430 | 2450 | | 173 | — | 4430 | 4450 | 4470 |
| 95 | 2450 | 2460 | 2475 | | 180 | 4600 | 4610 | 4630 | 4650 |
| 96 | 2480 | 2480 | 2490 | | 195 | — | 5000 | 5010 | 5030 |
| 97 | 2500 | 2500 | — | | 204 | — | 5220 | 5240 | |
| 98 | 2520 | 2530 | — | | 210 | — | 5370 | 5380 | 5400 |
| 100 | 2570 | 2580 | 2600 | | 220 | — | 5640 | 5650 | |
| 102 | 2630 | 2630 | 2650 | | 228 | — | — | 5850 | 5870 |
| 103 | 2650 | 2660 | — | | 238 | — | 6070 | 6100 | 6120 |
| 105 | 2700 | 2700 | 2720 | | 258 | — | — | — | 6630 |
| 108 | 2780 | 2790 | 2800 | 2820 | 268 | — | 6850 | 6860 | 6890 |
| 110 | 2830 | 2840 | 2850 | | 298 | — | — | 7620 | 7650 |
| 112 | 2880 | 2890 | 2900 | 2920 | 330 | — | — | — | 8460 |
| 114 | 2930 | 2940 | 2950 | | 336 | — | — | — | 8610 |
| 118 | — | 3040 | 3060 | | 358 | — | — | 9150 | 9170 |
| 120 | 3080 | 3090 | 3100 | 3130 | 418 | — | — | — | 10700 |
| 124 | 3190 | 3200 | 3210 | | 478 | — | — | — | 12200 |
| 128 | — | 3290 | 3310 | 3330 | 538 | — | — | — | 13700 |
| 130 | — | 3350 | 3360 | | 598 | — | — | — | 15200 |
| 132 | 3390 | 3400 | — | | 658 | — | — | — | 16800 |

Belts above 210" inside length are normally branded with mean length 2" longer than inside length.

Figura 3. 30. Longitud estándar de bandas.

Se seleccionó la banda B60 de $L_p = 1560$ [mm], se corrigió la distancia entre centros y se determinaron las tolerancias de instalación, Figura 3. 31 (véase Anexo 12):

$$C_{def} = C_{\min} + \frac{Lp_{def} - Lp}{2}$$

Ecuación 3. 55

$$C_{def} = 405 + \frac{1560,00 - 1454,09}{2}$$

$$C_{def} = 457,96 \quad [mm]$$

$$C_{def} = 457,96^{\pm 40} \quad [mm]$$

Table 12. Section B

Belt lengths*), matching, installation tolerances and belt length correction factors

| Belt No. | Standard pitch length ¹⁾ , mm | Installation tolerances | | Correction factor for belt length K ₁ |
|----------|--|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | Below calculated centre distance | Above calculated centre distance | |
| 35 | 930 | 25 | 25 | 0.83 |
| 38 | 1000 | 25 | 25 | 0.84 |
| 42 | 1100 | 25 | 40 | 0.85 |
| 46 | 1210 | 25 | 40 | 0.87 |
| 51 | 1340 | 25 | 40 | 0.89 |
| 55 | 1440 | 25 | 40 | 0.90 |
| 60 | 1560 | 25 | 40 | 0.93 |
| 64 | 1670 | 30 | 50 | 0.94 |
| 68 | 1760 | 30 | 50 | 0.95 |
| 71 | 1850 | 30 | 50 | 0.95 |
| 75 | 1950 | 30 | 50 | 0.97 |
| 78 | 2020 | 30 | 50 | 0.98 |
| 80 | 2070 | 30 | 50 | 0.99 |
| 85 | 2200 | 30 | 50 | 1.00 |
| 90 | 2330 | 30 | 50 | 1.01 |
| 97 | 2500 | 30 | 65 | 1.03 |
| 105 | 2700 | 30 | 65 | 1.04 |
| 112 | 2890 | 30 | 65 | 1.05 |
| 120 | 3090 | 30 | 65 | 1.06 |
| 128 | 3290 | 30 | 75 | 1.08 |
| 136 | 3500 | 30 | 75 | 1.09 |
| 144 | 3700 | 30 | 75 | 1.11 |
| 158 | 4050 | 30 | 75 | 1.13 |
| 162 | 4160 | 30 | 90 | 1.14 |
| 173 | 4430 | 30 | 90 | 1.15 |
| 180 | 4610 | 30 | 90 | 1.15 |
| 195 | 5000 | 30 | 90 | 1.18 |
| 210 | 5370 | 40 | 100 | 1.19 |
| 238 | 6070 | 40 | 100 | 1.22 |

Correction factors for arc of contact

| $\frac{D_p - d_p}{a}$ | β for small pulley | Correction factor for arc of contact (V-V. drive) K ₂ |
|-----------------------|--------------------------|--|
| 0.00 | 180 | 1.00 |
| 0.05 | 177 | 0.99 |
| 0.10 | 174 | 0.99 |
| 0.15 | 171 | 0.98 |
| 0.20 | 169 | 0.97 |
| 0.25 | 166 | 0.97 |
| 0.30 | 163 | 0.96 |
| 0.35 | 160 | 0.95 |
| 0.40 | 157 | 0.94 |
| 0.45 | 154 | 0.93 |
| 0.50 | 151 | 0.93 |
| 0.55 | 148 | 0.92 |
| 0.60 | 145 | 0.91 |
| 0.65 | 142 | 0.90 |
| 0.70 | 139 | 0.89 |
| 0.75 | 136 | 0.88 |
| 0.80 | 133 | 0.87 |
| 0.85 | 130 | 0.86 |
| 0.90 | 127 | 0.85 |
| 0.95 | 123 | 0.83 |
| 1.00 | 120 | 0.82 |
| 1.05 | 117 | 0.81 |
| 1.10 | 113 | 0.80 |
| 1.15 | 110 | 0.78 |
| 1.20 | 106 | 0.77 |
| 1.25 | 103 | 0.75 |
| 1.30 | 99 | 0.73 |
| 1.35 | 95 | 0.72 |
| 1.40 | 91 | 0.70 |
| 1.45 | 87 | 0.68 |
| 1.50 | 83 | 0.65 |

Figura 3. 31. Tolerancias de instalación y factores K de corrección.

De la Figura 3. 31, (Véase Anexo 11), se seleccionaron los factores K de corrección con interpolación) y se obtuvo $K_L = 0,93$ y $K_\beta = 0,9956$ que corresponde a un ángulo de agarre de $\beta = 178,69$ [°].

Se calculó el número de bandas necesarias para transmitir toda la potencia mediante la ecuación 3.56, así mismo se puede observar en la Figura 3. 32 el ancho recomendado para las poleas:

$$Z = \frac{PD}{P_Z \times K_L \times K_\beta} \quad \text{Ecuación 3. 56}$$

$$Z = \frac{12,30}{6,97 \times 0,93 \times 0,99}$$

$$Z = 1,91 \cong 2 \quad [\text{bandas}]$$

Table 18. Pulley width B mm (rounded-off) for grooved pulleys with standard groove spacing

| No of grooves | Standard grooved pulleys | | | | |
|---------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Section Z | A | B | C | D |
| 1 | 16 | 20 | 25 | 34 | 48 |
| 2 | 28 | 35 | 44 | 60 | 85 |
| 3 | 40 | 50 | 63 | 85 | 122 |
| 4 | 52 | 65 | 82 | 111 | 159 |
| 5 | 64 | 80 | 101 | 136 | 196 |
| 6 | 76 | 95 | 120 | 162 | 233 |
| 7 | 88 | 110 | 139 | 187 | 270 |
| 8 | 100 | 125 | 158 | 213 | 307 |
| 9 | 112 | 140 | 177 | 238 | 344 |
| 10 | 124 | 155 | 196 | 264 | 381 |
| For each extra groove add | 12 mm | 15 mm | 19 mm | 25 mm | 37 mm |

Figura 3. 32. Ancho recomendado para poleas.

En la locación del secador la instalación de un motor eléctrico de estas características hubiera representado incurrir en costos excesivos debido a que no existe red pública de energía cercana. Para suministrar la red de energía para equipos de esta potencia se requería el tendido de cables de alta tensión desde el punto más cercano ubicado a 200 [m]; la adquisición de un transformador, de un costo elevado en relación con los demás componentes del sistema; y, esperar los plazos requeridos por la empresa eléctrica de la localidad para realizar estos trabajos que superan los 60 días. Bajo estas consideraciones la instalación del motor eléctrico no es la mejor alternativa para el sistema.

La instalación de un motor de encendido por compresión (EC) de especificaciones técnicas equivalentes representa una alternativa de menor costo inicial, fácil y rápida instalación.

Considerando que la potencia del motor transferida al ventilador es la misma independientemente de pérdidas por fricción, conocidos los diámetros recomendados del juego de poleas (motor y ventilador) y la relación de transmisión entre ambos componentes, podemos asumir que el motor eléctrico funciona a su potencia nominal y mediante las ecuaciones.3.56, 3.57 y 3.58 calcular el torque requerido para que el motor pueda mover el ventilador a la velocidad de operación, 1670 [rpm].

$$P_{motor} = P_{ventilador} = P_{operación}$$

Ecuación 3. 57

$$P_{operación} = T_{motor} \times \omega_{motor} = T_{ventilador} \times \omega_{ventilador}$$

Ecuación 3. 58

$$T_{ventilador} = \frac{P_{operación}}{\omega_{ventilador}} \quad [N.m]$$

Ecuación 3. 59

$$T_{motor} = \frac{P_{operación}}{\omega_{motor}} \quad [N.m]$$

donde:

$P_{operación} \rightarrow$ Potencia nominal de operación [KW]

$T_{ventilador} \rightarrow$ Torque requerido por el ventilador [N.m]

$T_{motor} \rightarrow$ Torque requerido por el ventilador [N.m]

$\omega_{ventilador} \rightarrow$ Velocidad de operación del ventilador [rpm]

$\omega_{motor} \rightarrow$ Velocidad de operación del motor [rpm]

$n \rightarrow$ Relación de transmisión

$$P_{operación} = P_{motor}$$

$$P_{operación} = 15 \quad [HP] = 11,19 \quad [KW]$$

$$T_{motor} = \frac{11.185,50 \quad [W]}{1.750 \quad [s^{-1}]}$$

$$T_{motor} = 6,39 \quad [N.m]$$

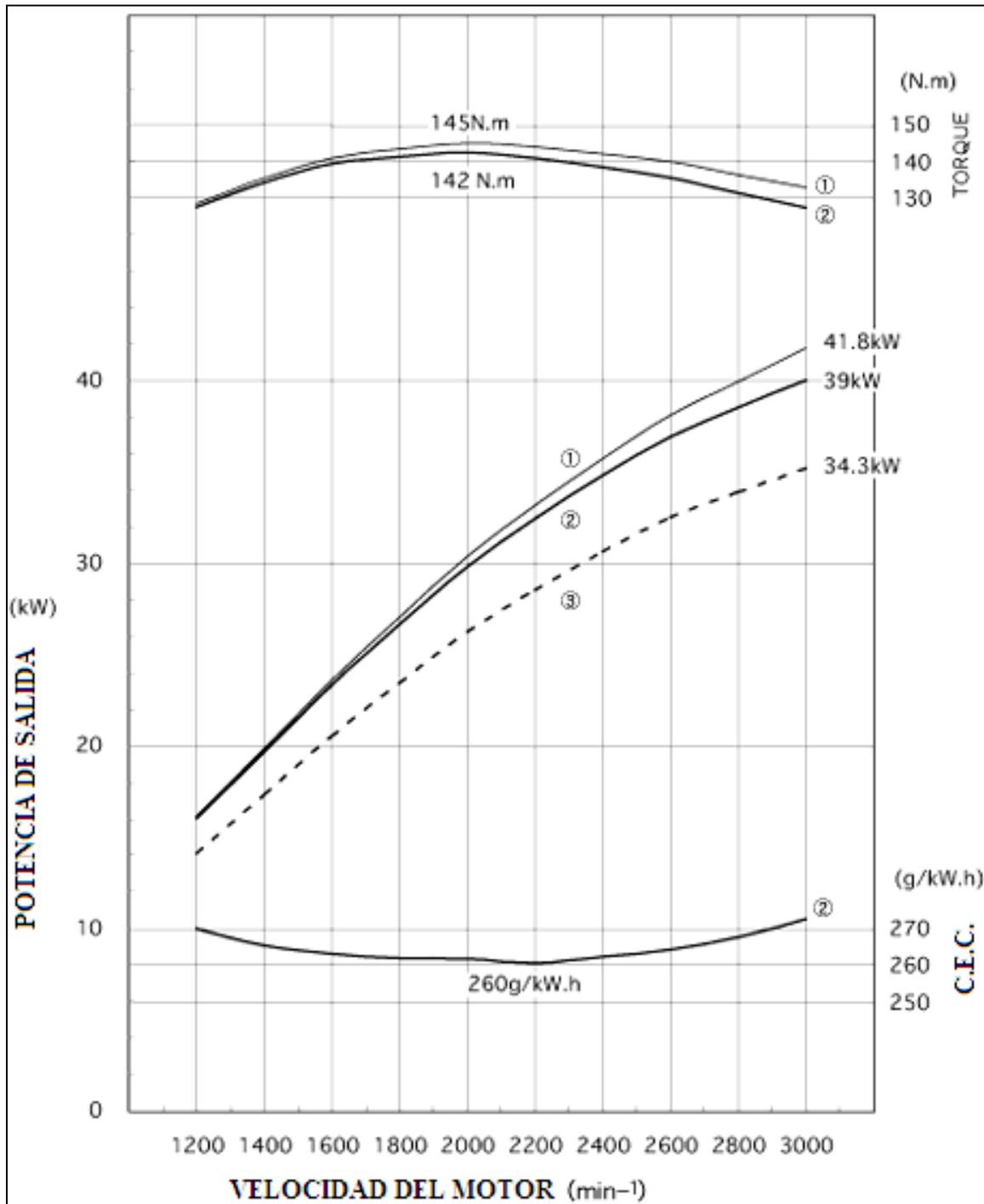


Figura 3. 33. Curva de comportamiento del motor ISUZU C 190

Como se puede observar, bajo las condiciones de trabajo establecidas ($\omega_{\text{motor}} = 1670 \text{ RPM}$) el motor ISUZU C190 suministra una potencia de 21 KW, superior a la potencia suministrada por el motor eléctrico.

Tabla 3. 41.Especificaciones técnicas Motores ISUZU

| Especificaciones técnicas Motores ISUZU | | | |
|--|---|-------------|--------------|
| Engine Model | C190 | 4JG1 | 4JG1T |
| Engine Characteristics | 4Cycle, Water Cooled, Vertical In-Line | | |
| Valvetrain Configuration | Over Head Valve | | |
| Type of Aspiration | Naturally Aspirated | | Turbocharged |
| Type of Injection | Indirect | Direct | Direct |
| No. of cilindres | 4 | 4 | 4 |
| Bore x Stroke (mm) | 86 x 102 | 95.4 x 107 | 95.4 x 107 |
| Displacement (Lit) | 2.369 | 3.059 | 3.059 |
| Compression ratio | 20 to 1 | 18.6 to 1 | 18.1 to 1 |
| Firing Order | 1-3-4-2 | 1-3-4-2 | 1-3-4-2 |
| Overall Dimensions | | | |
| Length (mm) | 800 | 791.5 | 787 |
| Width (mm) | 529 | 605.5 | 594.5 |
| Height(mm) | 694 | 708.5 | 778.5 |
| Dry Weight (kg) | 223 | 225 | 240 |
| Industrial Power | | | |
| Gross (SAE J1995) | | | |
| Max. Rated Output(kW/min-1) | 41.8 / 3000 | 48.0 / 2500 | 63.0 / 2500 |
| Max. Torque (N.m) | 145 | 205 | 265 |
| Net Performance (ISO 3046) | | | |
| Max. Rated Output(kW/min-1) | 39.0 / 3000 | 46.0 / 2500 | 61.0 / 2500 |
| Max. Torque (N.m) | 142 | 198 | 259 |
| Min.S.F.C(@ Full Load)(g/kW.h) | 260 | 222 | 220 |
| Generator Set Power (Net) | | | |
| 1500rpm Stand-by (kW/min-1) | 21.0 | 28.6 | 37.0 |
| 1500rpm Prime (kW) | 19.1 | 23.4 | 32.8 |
| 1800rpm Stand-by (kW/min-1) | 25.8 | 35.7 | 46.3 |
| 1800rpm Prime (kW) | 23.2 | 29.2 | 41.0 |
| Condition of Net power | | | |
| Cooling Fan (ϕ mm) | 380 | 380 | 400 |
| Intake Depression (kPa) | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Exhaust Back Pressure (kPa) | 0 | 0 | 0 |
| Lubrication System | Full forced pressure feed type | | |
| Oil Pump | Trochid type, gear driven from camshaft | | |
| Lub. Oil Capacity(Oil Pan Only)(Lit) | 8.0 | 9.6 | 9.6 |
| Type of Lubrication Oil | API CC or CD | | API CD |
| Cooling System | Water circulation type by pressurized Centrifugal vane type by vee belt driven | | |
| Coolant Capacity (Engine only)(Lit) | 5.2 | 4.5 | 4.5 |
| Fuel System | By plunger and nozzle,High pressure solid inj.type | | |

| Especificaciones técnicas Motores ISUZU (continuación) | | | |
|--|--|---------|---------|
| Injection Pump | Zexel make, In-line Bosch A type | | |
| Governor | RSV Variable speed control mechanical governor | | |
| Type of Fuel | Diesel fuel(SEA 2D Type) | | |
| Electric System | Negative grounding system, 12V | | |
| Starting Aid | Glow plug | | |
| Starter Motor (V-kW) | 12-2.2 | 12-2.2 | 12-2.2 |
| Alternator (V-A) | 12 - 35 | 12 - 35 | 12 - 35 |
| Battery Requirements | | | |
| Size (V-CCA) | 12-580 | 12-580 | 12-650 |
| Quantity | 1 | 1 | 1 |
| Referencia: Fabricante. www.isuzu.com | | | |

3.4. Selección de la alternativa óptima

3.4.1. Especificaciones técnicas

En la Tabla 3. 42 se presentan las principales características del maíz de secado así como las principales recomendaciones respecto a su proceso de secado.

Tabla 3. 42. Especificaciones técnicas del producto.

| Especificaciones técnicas del producto | | |
|---|------------------|----------------------|
| PRODUCTO | Maiz | |
| Reino: | Vegetal | |
| Clase: | Angiospermae | |
| Subclase: | Monocotyledoneae | |
| Orden: | Glumiflorae | |
| Familia: | Graminaceae | |
| Género: | Zea | |
| Especie: | Mays L. | |
| Nombre científico: | Zea Mays L. | |
| Nombres comunes: | Choclo, elote. | |
| CARACTERÍSTICA | | Unidad |
| Densidad real | 1.482,31 | [Kg/m ³] |
| Densidad aparente | 912,75 | |
| Porosidad | 38,33 | [%] |
| Contenido inicial de humedad | 20,00 | [%] |
| Temperatura máxima del aire para secado (alimentación animal) | 80 | [C] |
| Tiempo para revolver durante proceso de secado | 2 | [h] |
| Contenido de humedad máximo recomendado para almacenamiento. | 0,14 | [%] |
| Tiempo máximo de almacenamiento recomendado (condiciones estable) | 160 - 240 | [días] |
| Referencia: Autores. | | |

Las especificaciones técnicas de la cámara de secado (bandeja), chapa perforada y cámara de distribución de aire (campana difusora) se refieren principalmente a sus dimensiones y capacidad de procesamiento.

Tabla 3. 43. Cámara de secado, chapa perforada y cámara de distribución de aire.

| Cámara de secado, chapa perforada y cámara de distribución de aire. | | |
|--|-----------|-------------------|
| Largo | 11,8 | [m] |
| Ancho | 3,8 | |
| Altura del lecho | 0,75 | |
| Altura de la cámara | 0,96 | |
| Área del secador | 44,84 | [m ²] |
| Volumen del lecho | 33,63 | [m ³] |
| Capacidad de carga máxima | 30.695,78 | [Kg] |
| | 30,70 | [Ton] |
| | 675,31 | [qq] |
| Pérdida máxima de presión | 256,25 | [Pa] |
| | 1,03 | [" c.d.a] |
| Referencia: Autores. | | |

Las especificaciones técnicas de los componentes seleccionados: ventilador centrífugo, quemador tipo tobera, motor EC – Diesel y bandas tipo B se presentan en la Tabla 3. 44:

Tabla 3. 44.Especificaciones Técnicas Ventilador.

| Especificaciones Técnicas Ventilador Centrífugo | | |
|--|-------------------|---------------------|
| Modelo | BP - AL 11 | Dimensiones |
| Caudal de operación | 8 | [m ³ /s] |
| | 16951,04 | [cfm] |
| Presión de operación | 1100,00 | [Pa] |
| | 4,00 | [" c.d.a] |
| Potencia Nominal | 15 | [HP] |
| Velocidad Motor | 1750 | [RPM] |
| Velocidad Rotor (Ventilador) | 1666,67 | [RPM] |
| Diámetro polea Motor | 200 | [mm] |
| Diámetro polea Rotor | 210 | [mm] |
| Polea doble canal Tipo B | | |
| Referencia: Catalogo INDUHORST. | | |

Tabla 3. 45. Especificaciones técnicas del quemador de gas tipo tobera QG – 3.

| Especificaciones técnicas del quemador de gas tipo tobera QG – 3 | | | | | |
|--|------------------|------------------------|----------|------|-----|
| Modelo | Combustión | Valor térmico | Cantidad | | |
| | [Kg Gas/hora] | [BTU/h] | [Un] | | |
| QG – 3 | 16 48 | 800.000 2'400.000 | 48 | | |
| Modelo | L | L | Hmin | Hmax | D |
| | Dimensiones [mm] | | | | |
| QG – 3 | 1370 | 850 | 1370 | 397 | 432 |
| Referencia: Catalogo INDUHORST. | | | | | |

Tabla 3. 46. Especificaciones del motor C 190.

| Especificaciones del motor C 190 | |
|---|--|
| Modelo de motor | C190 |
| Características del motor | 4 Ciclos, enfriado por agua, vertical en línea |
| Configuración del posicionamiento de válvulas | Over Head Valve |
| Tipo de aspiración | Aspiración natural |
| Tipo de inyección | Indirecta |
| Número de cilindros | 4 |
| Diámetro x Carrera (mm) | 86 x 102 |
| Desplazamiento (Lt) | 2.369 |
| Relación de compresión | 20 to 1 |
| Orden de encendido | 1-3-4-2 |
| Dimensiones totales | |
| Longitud (mm) | 800 |
| Ancho (mm) | 529 |
| Altura (mm) | 694 |
| Peso seco (kg) | 223 |
| Potencia | |
| Gross (SAE J1995) | |
| Salida Max. medida (kW/min-1) | 41.8 / 3000 |
| Torque Max. (N.m) | 145 |
| Desempeño neto (ISO 3046) | |
| Salida Max. medida (kW/min-1) | 39.0 / 3000 |
| Torque Max. (N.m) | 142 |
| C.E.C. Min. (@ plena carga)(g/kW.h) | 260 |
| Generación de potencia (Neta) | |
| 1500rpm Relantí (kW/min-1) | 21.0 |
| 1500rpm Prime (kW) | 19.1 |
| 1800rpm Relantí (kW/min-1) | 25.8 |

| Especificaciones del motor C 190 (continuación) | |
|---|---|
| 1800rpm Prime (kW) | 23.2 |
| Condiciones de Potencia Neta | |
| Ventilador de enfriamiento (ϕ mm) | 380 |
| Presión de vacío a la entrada (kPa) | 2.5 |
| Retorno de la Presión de salida (kPa) | 0 |
| Sistema de lubricación | Tipo presión de alimentación completamente forzada |
| Bomba de aceite | Tipo Trochid, engrane conducido por árbol de levas |
| Capacidad de aceite lubricante (Solamente reservorio de aceite)(Lt) | 8.0 |
| Tipo de aceite de lubricación | API CC o CD |
| Sistema de enfriamiento | Tipo circulación de agua por presurización |
| | Tipo centrifugo conducido por banda tipo V |
| Capacidad de refrigerante (Solamente motor)(Lt) | 5.2 |
| Sistema de combustible | By plunger and nozzle, Tipo inyector solid de alta presión. |
| Bomba de inyección | Fabricación Zexel, Tipo Bosch A en línea |
| Governor | RSV Governor mecánico control velocidad variable |
| Tipo de combustible | Diesel (SEA 2D Type) |
| Sistema eléctrico | Sistema aterrizamiento negativo, 12V |
| Asistencia de encendido | Bujía de precalentamiento |
| Motor de arranque (V-kW) | 12-2.2 |
| Alternador (V-A) | 12 – 35 |
| Requerimientos de batería | |
| Tamaño (V-CCA) | 12-580 |
| Cantidad | 1 |
| Referencia: Fabricante. www.isuzu.com . Traducción: Autores. | |

Las especificaciones técnicas del proceso de secado se presentan en la Tabla 3.47:

Tabla 3. 47.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO.

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------|--------|
| Tiempo secado | 39960 | [s] | 11,1 | [h] |
| Masa real de maíz | 30.695,78 | [Kg] | 675,31 | [qq] |
| Masa agua (por remover) | 2.141,57 | [Kg] | | |
| Flujo aire | 8 | [m ³ /s] | 5,89 | [Kg/s] |
| Temperatura ambiente (bulbo seco) | 4,80 | [°C] | | |
| Temperatura ambiente (bulbo húmedo) | 4,80 | [°C] | | |
| Humedad relativa ambiente | 100% | [%] | | |
| Temperatura proceso | 80,00 | [°C] | | |
| Humedad relativa proceso | 1,82% | [%] | | |
| Temperatura salida | 19,00 | [°C] | | |
| Humedad relativa salida | 87,82% | [%] | | |
| Consumo combustible | 33,28 | [tanques] | | |
| Eficiencia de secado | 29,26% | [%] | | |
| Referencia: Autores. | | | | |

3.5. Programa de pruebas

El programa de pruebas para el presente proyecto se diseñó para cumplir con dos propósitos específicos: validar el modelo matemático que fundamentó la selección de los equipos del secador y evaluar la calidad del proceso de secado.

3.5.1. Tipos de pruebas

Algunas de las propiedades del grano como densidad, EMC y contenido de humedad a partir de los cuales se realizaron varios cálculos y suposiciones, están disponibles en libros, publicaciones temáticas y en información publicada en el Internet. Sin embargo, los autores no pudieron asegurar que dicha información sea completamente compatible con el tipo de maíz que se va a procesar. Por este motivo se realizó una medición directa de las variables de interés en varios lotes de maíz, principalmente el contenido de humedad inicial del grano, sobre una muestra seleccionada de forma aleatoria en cada lote.

El primer tipo de prueba experimental tiene como propósito validar la exactitud del modelo matemático planteado en el capítulo anterior. Primeramente deben medirse las variables de entrada y salida en condiciones normales de operación para compararlas con los resultados que se obtienen con la hoja de Excel desarrollada por los autores. De obtenerse resultados satisfactorios y validarse la utilidad del modelo matemático para predecir el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de secado, se validará su utilidad para el diseño y selección de los equipos de los sistemas de calentamiento y de suministro de aire de secado.

El segundo tipo de prueba establece la utilización de cartas de control del contenido de humedad del grano después del proceso de secado para comprobar la efectividad del proceso y la calidad del producto.

3.5.2. Métodos

Para realizar el muestreo del producto y medir características como densidad real y aparente o contenido de humedad inicial del grano se dividió el lote de maíz del secador en 48 secciones de 1 [m²] de superficie aproximada y se tomó una muestra aleatoria cuyo tamaño se determinó a partir de la ecuación 3.60:

$$n_0 = \frac{(Z_0)^2 \cdot \sigma^2}{E_0^2} \quad \text{Ecuación 3. 60}$$

donde,

n_0 → Tamaño de la muestra [u]

Z_0 → Probabilidad asociada al nivel de confianza

σ → Desviación estándar de la población [%]

E → Error máximo permisible de la media muestral [%]

Dado que la desviación estándar poblacional es desconocida se realizó una muestra piloto de tamaño $n_p = 10$ para calcular la desviación estándar de la muestra y asumir que es una buena estimación de la desviación estándar poblacional para determinar el tamaño de la muestra.

Los datos obtenidos en la muestra piloto, formato de registro (F1 – A, véase Anexo A17) así como el valor de su desviación estándar se presentan en la Tabla 3. 48

Tabla 3. 48. Muestra piloto para el Contenido de humedad del maíz.

| F1- A - Formato de registro de muestra piloto | | | |
|---|----------|----------------------|--|
| Responsable | | | |
| Fecha | | # Prueba | |
| Variable: Contenido de humedad del maíz | | | |
| N | $\phi 1$ | $(X-X)^2$ | |
| 1 | 0,20 | 1,44E-06 | |
| 2 | 0,20 | 2,70E-05 | |
| 3 | 0,20 | 4,00E-08 | |
| 4 | 0,22 | 2,50E-04 | |
| 5 | 0,19 | 1,49E-04 | |
| 6 | 0,19 | 6,72E-05 | |
| 7 | 0,20 | 1,44E-06 | |
| 8 | 0,21 | 3,36E-05 | |
| 9 | 0,21 | 9,60E-05 | |
| 10 | 0,20 | 1,02E-05 | |
| Promedio | 0,2012 | $\Sigma = 0,0006356$ | |
| Desviación estándar ³² | | 0,008403703 | |
| Observaciones: | | | |
| | | | |
| | | | |
| Referencia: Autores. | | | |

Una vez determinada la desviación estándar de la muestra, que se asume como estimador de la varianza poblacional, se calculó el tamaño de la muestra mediante la Ec.3.60 y posteriormente el tamaño de la muestra corregido para poblaciones finitas mediante la Ec.3.60. Se escogió un nivel de confianza del 99% y un error permisible de 0,5%, lo cual significa que al realizar el muestreo del tamaño calculado se tiene un 99% de certeza de que la media muestral tendrá 0,5% de error con respecto a la media poblacional.

$$n = \frac{n_0 \times N}{n_0 + (N - 1)} \quad \text{Ecuación 3. 61}$$

³² La desviación estándar muestral se calculó mediante la expresión $s = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}$

donde,

$n \rightarrow$ Tamaño de la muestra corregido para poblaciones finitas [u]

$n_0 \rightarrow$ Tamaño de la muestra [u]

$$NC = 99\% \rightarrow Z_0 = 2,33$$

$$E = 0,5\% = 0,005$$

$$\sigma = s = 0,8403\% = 0,0084$$

$$n_0 = \left(\frac{Z_0 \cdot \sigma}{E} \right)^2$$

$$n_0 = \left(\frac{(2,33) \times (0,0084)}{(0,005)} \right)^2$$

$$n_0 = 15,34$$

$$N = 48$$

$$n = \frac{n_0 \times N}{n_0 + (N - 1)} \quad [U]$$

$$n = \frac{15,34 \times 48}{15,34 + (48 - 1)}$$

$$n = 11,81 \approx 12 \quad [U]$$

Para las pruebas experimentales de validación del modelo matemático se desarrollaron formatos de registro de las variables de entrada y salida que intervienen en el proceso de secado para su posterior alimentación y comparación con los valores de salida de la hoja de Excel.

Para realizar las pruebas de calidad del producto sometido al proceso de secado se determinaron las variables para realizar un muestreo de aceptación cuyas mediciones posteriormente se registren en cartas de control de procesos.

3.5.3. Parámetros

Los variables de interés para evaluar la operación de secado se refieren a las condiciones iniciales del grano y del ambiente, mientras que los parámetros del proceso se refieren a las condiciones del aire de entrada y de salida del lecho de maíz, así como tiempo de operación y consumos de combustible.

Parámetros del producto:

- Masa
- Volumen
- Contenido de humedad inicial
- Contenido de humedad final

Condiciones del aire de secado:

- Temperatura ambiental de bulbo seco
- Temperatura ambiental de bulbo húmedo
- Temperatura de bulbo seco del aire de secado
- Temperatura de bulbo húmedo del aire de secado
- Temperatura de bulbo seco del aire de salida del lecho
- Temperatura de bulbo húmedo del aire de salida del lecho

Parámetros del proceso:

- Velocidad de operación del motor y ventilador
- Caudal de aire
- Tiempo de secado
- Consumo de combustible: gas y diesel

3.5.4. Equipos e instrumentos

Para las pruebas experimentales de validación del modelo matemático se desarrollaron formatos de registro de las variables de entrada y salida que intervienen en el proceso de secado para su posterior alimentación y comparación con los valores de salida de la hoja de Excel. En la siguiente tabla se clasifican los instrumentos de medición utilizados.

Tabla 3. 49. Equipos e instrumentos utilizados en las pruebas.

| Equipos e instrumentos utilizados en las pruebas | | |
|---|--|--------------------|
| Variable | Instrumento de medición | Apreciación |
| Parámetros del producto | | |
| Masa: | Balanza | 1 [gr] |
| Volumen: | Matraz | 10 [ml] |
| Contenido de humedad del grano: | Hidrómetro | [0,1 %] |
| |  | |
| | Figura 3. 34. Hidrómetro | |
| Condiciones del aire: Estados 1, 2 y 3 | | |
| Temperaturas bulbo seco: | Termómetro de mercurio | 1 [C] |
| Temperaturas bulbo húmedo: | Termómetro de mercurio | 1 [C] |
| Parámetros del proceso: | | |
| Velocidad de operación del motor | Tacómetro | 100 [rpm] |
| Velocidad de operación del ventilador: | Lámpara estroboscópica | 1 [rpm] |
| Caudal de aire: | Anemómetro | |
| Tiempo de secado: | Cronómetro | 1 [s] |
| Consumo de gas | Verificación visual | Tanques [U] |
| Consumo de diesel | Verificación visual | [Lt] |
| Presión de gas: | Manómetro | [psi] |
| Referencia: Autores. | | |

3.5.5. Desarrollo de formatos y registros

Se desarrolló un formato de registro de los datos de las variables que deben medirse en el proceso de secado (F2, véase Anexo A19) y un formato que sirve para la comparación entre los valores medidos y los valores calculados (F3, véase Anexo A. 20).

| F2 - Hoja de registro de datos del proceso de secado | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|---------|
| Responsable | | | | Fecha: | | | # Prueba | | |
| | Característica | Símbolo | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Medición 4 | Medición 5 | Unidades | |
| Producto | Volumen aparente | vol | | | | | | [m ³] | |
| | Masa recipiente | | | | | | | | |
| | Masa maíz | m | | | | | | [gr] | |
| | Volumen inicial agua | | | | | | | | |
| | Volumen final agua y maíz | | | | | | | [m ³] | |
| Condiciones ambiente | Temperatura bulbo seco | Tas1 | | | | | | [C] | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah1 | | | | | | | |
| Aire de secado | Temperatura bulbo seco | Tas2 | | | | | | | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah2 | | | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | | | | | | | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | | | | | | | |
| Proceso | Velocidad de operación motor | wm | | | | | | | [r.p.m] |
| | Velocidad de operación ventilador | wvent | | | | | | | |
| | Caudal de aire | ma | | | | | | | |
| | Tiempo de secado | t | | | | | | [h] | |
| | Volumen inicial de diesel | | | | | | | | |
| | Volumen final de diesel | | | | | | | | |
| | Consumo de gas | cc | | | | | | | |
| Observaciones | | | | | | | | | |

Figura 3. 35. Formato (F2) de registro de datos del proceso de secado.

| F3 - Hoja de evaluación del software de cálculo | | | | | | | |
|---|--|---------|------------|------------|------------|----------|-------|
| Responsable | | | | Fecha: | | | |
| | Característica | Símbolo | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Unidades | |
| Valores medidos de las características del proceso | | | | | | | |
| Producto | Masa maíz | m | | | | [qq] | |
| | Contenido de humedad inicial del grano | φ1 | | | | [%] | |
| Condiciones ambiente | Temperatura bulbo seco | Tas1 | | | | [C] | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah1 | | | | | |
| Aire de secado | Temperatura bulbo seco | Tas2 | | | | | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah2 | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | | | | | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | | | | | |
| Proceso | Tiempo secado | t | | | | | [s] |
| | Flujo aire (velocidad) | | | | | | [m/s] |
| | Contenido de humedad final del grano | φ2 | | | | [%] | |
| Valores calculados | | | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | | | | [C] | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | | | | | |
| Proceso | Tiempo secado | t | | | | [s] | |
| | Contenido de humedad final del grano | φ2 | | | | [%] | |
| Errores obtenidos | | | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | | | | [%] | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | | | | | |
| Proceso | Tiempo secado | t | | | | | |
| | Contenido de humedad final del grano | φ2 | | | | | |
| Observaciones | | | | | | | |

Figura 3. 36. Formato (F3) - Hoja de evaluación de software de cálculo.

Así mismo se preparó un formato para desarrollar las cartas de control del contenido de humedad inicial y final del grano (F4 y F5, véanse Anexo A 21 y Anexo A. 22).

| F4 - Hoja de registro de contenidos de humedad inicial #1 | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------|----------|
| Responsable | MEDIAS | | Fecha: | | LIC | LSC | |
| Tamaño de la muestra | 4 | A2 | | | 15,00% | 25,00% | |
| | | d2 | | | D3 | D4 | |
| | | LC | 1,00% | LIC | 0,00% | LSC | 2,00% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio (X) | Rango (R) | Unidades |
| 1 | | | | | | | [%] |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | 20,00% | | |

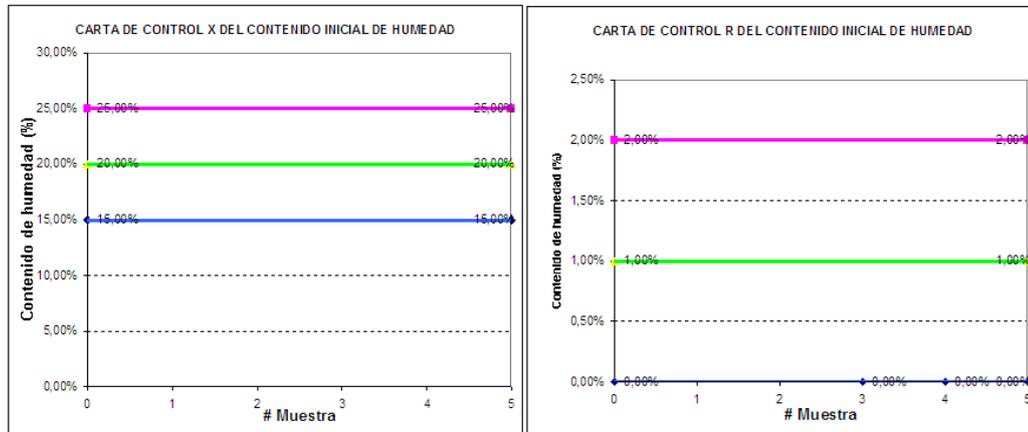


Figura 3. 37. Formato (F4) -Registro y control del Contenido de humedad inicial.

| F5 - Hoja de registro de contenidos de humedad final #2 | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|----------|--------|----------|
| Responsable | MEDIAS | | Fecha: | | LIC | LSC | |
| Tamaño de la muestra | 4 | A2 | | | 12,00% | 16,00% | |
| | | d2 | | | D3 | D4 | |
| | | LC | 1,00% | LIC | 0,00% | LSC | 2,00% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio | | Unidades |
| 1 | | | | | | | [%] |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | 14,00% | | |

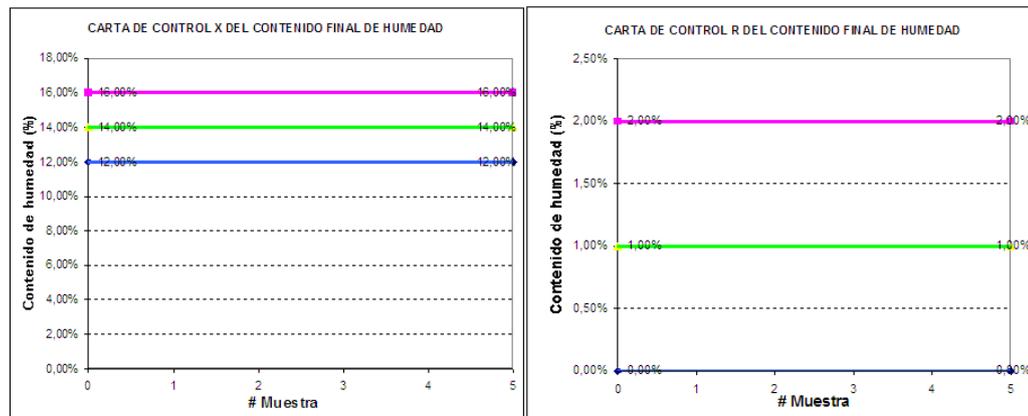


Figura 3. 38. Registro y control del Contenido de humedad final.

3.5.6. Evaluación final

El software desarrollado por los autores en Excel permite ingresar los valores anotados en los formatos F1, F2, F3 y F4 para obtener los datos de salida.

3.6. Diseño de planos constructivos

Los planos de la secadora se hicieron en Autocad, tomando como base los datos de la inspección realizada por los autores. Véase sección planos.

3.7. Diseño de la implementación

Los tiempos de ejecución se establecen en el Diagrama Gantt que se presenta en el Anexo B.3.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

La variedad de técnicas de secado y relativa complejidad teórica de los procesos que involucra su entendimiento contrasta con la simplicidad de su construcción e instalación. A continuación se presentan breves procedimientos generales que deben seguirse secuencialmente para implementar el proyecto:

4.1. Adecuación de los subsistemas existentes

Como obras preliminares a la instalación de los equipos de los sistemas principales se realizaron las siguientes actividades.

- Limpiar instalaciones
- Obra civil. Construir:
 - Contrapiso
 - Paredes
 - Colocar mallas del cerramiento
 - Empotrar la campana difusora en la pared de la cámara de secado.

4.2. Construcción e instalación de equipos

Para instalar los diferentes equipos de los sistemas de calentamiento y ventilación forzada de la secadora se siguió el siguiente procedimiento:

- Conectar ventilador a la campana difusora
- Fijar ventilador al piso
- Construir bases del motor
- Construir acople de conexión del motor a la polea

- Afinar motor: revisar y reemplazar bujías de precalentamiento, calibrar bomba de inyección, cambiar filtros, cambiar aceite de motor, revisión nivel de agua, dosificar refrigerante.
- Alinear poleas del motor y ventilador
- Tensar bandas
- Fijar base del motor al piso
- Instalar tubo de escape

4.3. Instalación de instrumentos

- Instalar instrumentación y control del motor: tacómetro, sensor de temperatura, medidor de corriente.

4.4. Pruebas de evaluación en funcionamiento

Se realizaron tres operaciones de secado, se llenaron los formatos F1, F2, F3, F4 y F5 (Véase Anexo D1) y se obtuvieron los valores que se muestran en las Tablas 4.1- 4.5

Tabla 4. 1. F1 – B – Formato de registro de muestra.

| F1 – B – Formato de registro de muestra | | | |
|---|--|------------|-------|
| Responsable | | | |
| Fecha: | | # Prueba | |
| Variable: Contenido de humedad inicial del maíz (%) | | | |
| N | $\phi 1$ | $(X-X)^2$ | |
| 1 | 24,00% | 0,04% | |
| 2 | 23,80% | 0,03% | |
| 3 | 22,90% | 0,01% | |
| 4 | 23,50% | 0,02% | |
| 5 | 23,70% | 0,03% | |
| 6 | 20,10% | 0,04% | |
| 7 | 21,80% | 0,00% | |
| 8 | 21,50% | 0,00% | |
| 9 | 21,00% | 0,01% | |
| 10 | 20,90% | 0,01% | |
| 11 | 20,00% | 0,04% | |
| 12 | 22,00% | 0,00% | |
| Promedio | 22,10% | $\Sigma =$ | 0,23% |
| Desviación estándar | | 1,45% | |
| Observaciones | Datos correspondientes a la primera prueba de evaluación de la secadora. | | |
| Referencia: Autores. | | | |

Con el valor del promedio muestral y la desviación estándar muestral se estableció un intervalo de confianza con nivel de significancia del 90%³³ para el contenido de humedad inicial del grano. Se tomo el límite superior para obtener los demás resultados del modelo matemático (Ecuación 3.13), tal como se muestra a continuación:

$$\mu = \bar{X} \pm t_{\alpha, gl} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 4. 1

³³ Se estableció un intervalo de confianza para el valor del parámetro poblacional a partir del estadístico muestral. Con una muestra pequeña, menor a 30 elementos, se aplicó la distribución t de Student (véase Anexo A. 16) con nivel de significancia 90%, prueba de dos colas y 12 – 1 = 11 grados de libertad.

donde,

$\mu \rightarrow$ Promedio poblacional del contenido inicial de humedad [%]

$\bar{X} \rightarrow$ Promedio muestral del contenido inicial de humedad [%]

$s \rightarrow$ Desviación estándar muestral del contenido de humedad [%]

$n \rightarrow$ Tamaño de la muestra [u]

$t \rightarrow$ Estadístico t de la distribución de Student

$$NC = 90\% \rightarrow \alpha = 0,1 \quad L.S. = \bar{X} \pm t_{\alpha, g.l.} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$g.l. = n - 1 = 12 - 1 \quad L.S. = 22,1 + 1,796 \cdot \frac{1,45}{\sqrt{12}}$$

$$g.l. = 11 \quad L.S. = 22,85 \quad [\%]$$

$$t_{\alpha=0,1, g.l.=11} = 1,796$$

Así mismo, se estableció la utilización de diagramas de control para los contenidos inicial y final de humedad del grano, se tomó un tamaño de muestra $n = 4$ y se determinaron obtuvieron los factores de control de la Tabla 4. 2:

Tabla 4. 2. Factores para Diagramas de Control.

| Número de elementos de la muestra n | Cuadro para promedios | Cuadro para amplitudes de variación | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------|
| | Factores para límites de control | Factores para línea central | Factores para límites de control | |
| | A2 | d2 | D2 | D4 |
| 2 | 1,050 | 1,428 | 0,000 | 2,257 |
| 3 | 1,023 | 1,693 | 0,000 | 2,578 |
| 4 | 0,729 | 2,059 | 0,000 | 2,282 |
| 5 | 0,577 | 2,328 | 0,000 | 2,115 |
| 6 | 0,483 | 2,534 | 0,000 | 2,034 |
| 7 | 0,419 | 2,704 | 0,105 | 1,924 |
| 8 | 0,373 | 2,047 | 0,135 | 1,804 |
| 9 | 0,337 | 2,970 | 0,104 | 1,815 |
| 10 | 0,200 | 3,078 | 0,223 | 1,777 |
| 11 | 0,205 | 3,173 | 0,255 | 1,744 |
| 12 | 0,266 | 3,255 | 0,204 | 1,716 |
| 13 | 0,249 | 3,335 | 0,308 | 1,092 |
| 14 | 0,235 | 3,407 | 0,329 | 1,571 |
| 15 | 0,222 | 3,472 | 0,348 | 1,852 |

$$n = 4$$

$$A_2 = 0,729$$

$$d_2 = 2,059$$

$$D_3 = 0$$

$$D_4 = 2,282$$

Para el Diagrama de Medias (\bar{X}) los límites de control se calcularon mediante las ecuaciones 4.2 y 4.3 , mientras que para el Diagrama de Amplitudes de Variación (\bar{R}) los límites de control se calcularon con las ecuaciones 4.4 – 4.6:

Diagrama de Medias:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad \text{Ecuación 4. 2}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad \text{Ecuación 4. 3}$$

Diagrama de Amplitudes de Variación:

$$LC = d_2 \cdot \bar{R} \quad \text{Ecuación 4. 4}$$

$$LSC = D_4 \cdot \bar{R} \quad \text{Ecuación 4. 5}$$

$$LIC = D_3 \cdot \bar{R} \quad \text{Ecuación 4. 6}$$

Los resultados se muestran en el ANEXO E. 1

Se tabularon las lecturas obtenidas que se presentan en la Tabla 4. 3. A continuación, se ingresaron los datos de entrada en el software de evaluación y se siguieron los cálculos descritos en la sección en la sección 3.3.4, (Sistema de calentamiento de aire); se calcularon los errores entre los valores reales y los valores calculados por los autores de acuerdo a la ecuación 3.39, los resultados se presentan en la Tabla 4. 4:

Tabla 4. 3. F2 - Hoja de registro de datos del proceso de secado.

| F2 - Hoja de registro de datos del proceso de secado | | | | | | |
|--|-----------------------------------|------------|------------|------------|----------|---------|
| Responsable | | | | | Fecha: | |
| Característica | Símbolo | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Unidades | |
| Producto | Masa maiz | m | 400,0 | 420,0 | 350,0 | [gr] |
| Condiciones ambiente | Temperatura bulbo seco | Tas1 | 18,0 | 20,0 | 22,0 | [C] |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah1 | 16,0 | 17,0 | 20,0 | |
| Aire de secado | Temperatura bulbo seco | Tas2 | 82,0 | 80,0 | 82,0 | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah2 | 29,5 | 29,0 | 29,5 | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | 26,0 | 24,0 | 24,0 | |
| Proceso | Velocidad de operación motor | wm | | | | [r.p.m] |
| | Velocidad de operación ventilador | wvent | | | | |
| | Caudal de aire | ma | 8,0 | 8,0 | | |
| | Tiempo de secado | t | 12,0 | 12,5 | | [h] |
| | Volumen inicial de diesel | | | | | |
| | Volumen final de diesel | | | | | |
| | Consumo de gas | cc | 3,0 | | | |
| Observaciones | | | | | | |

Tabla 4. 4. F3 - Hoja de evaluación del software de cálculo.

| F3 - Hoja de evaluación del software de cálculo | | | | | | |
|---|--|------------|------------|------------|----------|-------|
| Responsable | | | | | Fecha: | |
| Característica | Símbolo | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Unidades | |
| Valores medidos de las características del proceso | | | | | | |
| Producto | Masa maíz | m | 400,0 | 420,0 | 350,0 | [qq] |
| | Contenido de humedad inicial del grano | ϕ_1 | 22,85% | 22,34% | 0,2 | [%] |
| Condiciones ambiente | Temperatura bulbo seco | Tas1 | 18,0 | 20,0 | 22,0 | [C] |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah1 | 16,0 | 17,0 | 20,0 | |
| Aire de secado | Temperatura bulbo seco | Tas2 | 82,0 | 80,0 | 82,0 | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah2 | 29,5 | 29,0 | 29,5 | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | 26,0 | 23,0 | 24,0 | |
| Proceso | Tiempo secado | t | 12,0 | 12,5 | 0,0 | [s] |
| | Flujo aire (velocidad) | | 8,0 | 8,0 | 0,0 | [m/s] |
| | Contenido de humedad final del grano | ϕ_2 | 14,50% | 14,23% | 14,02% | [%] |
| Valores calculados | | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | 28,5 | 28,0 | 33,0 | [C] |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | 24,0 | 23,0 | 24,0 | |
| Proceso | Tiempo secado | t | 12,0 | 12,0 | 10,0 | [s] |
| | Contenido de humedad final del grano | ϕ_2 | 14,00% | 14,00% | 0,1 | [%] |
| Errores obtenidos | | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | -5,26% | 7,14% | -9,09% | [%] |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | -8,33% | 0,00% | 0,00% | |
| Proceso | Tiempo secado | t | 0,00% | -4,17% | 100,00% | |
| | Contenido de humedad final del grano | ϕ_2 | -3,57% | 1,64% | 0,00% | |
| Observaciones | | | | | | |
| Referencia: Autores. | | | | | | |

Finalmente se utilizaron cartas de control del contenido de humedad del grano después del proceso de secado para comprobar la efectividad del proceso y la calidad del producto. Se registraron los valores que se muestran en la Tabla 4. 5:

Tabla 4. 5.Formato de registro de muestra Contenido de humedad final del maíz (%)

| F1 - C - Formato de registro de muestra | | | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| Responsable | | | |
| Fecha: | | # Prueba | |
| Variable: Contenido de humedad final del maíz (%) | | | |
| N | $\phi 1$ | $(X-X)^2$ | |
| 1 | 15,30% | 0,01% | |
| 2 | 13,80% | 0,00% | |
| 3 | 13,90% | 0,00% | |
| 4 | 14,90% | 0,00% | |
| 5 | 14,50% | 0,00% | |
| 6 | 14,50% | 0,00% | |
| 7 | 14,80% | 0,00% | |
| 8 | 14,20% | 0,00% | |
| 9 | 14,10% | 0,00% | |
| 10 | 15,00% | 0,00% | |
| 11 | 15,00% | 0,00% | |
| 12 | 14,00% | 0,00% | |
| Promedio | 14,50% | $\Sigma =$ | 0,03% |
| Desviación estándar | | 0,50% | |
| Observaciones | Datos correspondientes a la | | |
| primera prueba de evaluación de la secadora. | | | |
| Referencia: Autores | | | |

Finalmente se calculó un intervalo de confianza con nivel de significancia del 90% para el contenido de humedad final del grano, utilizando la Ecuación 4.1:

$$NC = 90\% \rightarrow \alpha = 0,1$$

$$g.l = n - 1 = 12 - 1$$

$$g.l = 11$$

$$t_{\alpha=0,1, g.l=11} = 1,796$$

$$L.S. = \bar{X} \pm t_{\alpha,gl} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$L.S. = 14,5 + 1,796 \cdot \frac{0,5}{\sqrt{12}}$$

$$L.S. = 14,76 \quad [\%]$$

$$L.I. = 14,5 - 1,796 \cdot \frac{0,5}{\sqrt{12}}$$

$$L.S. = 14,24 \quad [\%]$$

En este caso, se puede concluir con una confiabilidad del 90%, que el promedio del contenido de humedad de la población se encuentra entre 14,24% y 14,76% que es un valor aceptable para el proceso de secado.

Los resultados se muestran en el ANEXO E. 2.

Producto del análisis de los resultados obtenidos, principalmente de los errores obtenidos al comparar los valores reales con los valores teóricos, se destaca que en casi todos los casos las desviaciones fueron inferiores al 5% lo que valida su utilidad para predecir las interacciones del proceso de secado.

En forma complementaria, el análisis de las cartas de control demuestra que los contenidos de humedad inicial y final del grano son satisfactorios pues son procesos que se encuentran bajo control y dentro de los parámetros adecuados.

CAPÍTULO V

ESTUDIO ECONÓMICO FINANCIERO

El objetivo del análisis económico financiero de este proyecto es demostrar que la inversión realizada en el sistema de secado propuesto proporcionará a la compañía Trans. Comercio Guerra Ayala flujos de efectivo adicionales cuyo Valor Actual Neto (VAN) sea positivo con una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior al rendimiento del dinero en el sistema financiero. Para cumplir con este propósito se analizó el actual negocio de la compra y venta de maíz seco y se lo comparó con el negocio de comprar maíz tierno, realizar la operación de secado y comercializar el producto seco.

5.1. Análisis de costos

Actualmente el negocio de la compañía, que consiste en la compra y venta de maíz seco, es una operación rentable; la implementación del proceso de secado del maíz dentro del actual esquema busca incrementar los flujos de efectivo provenientes de su comercialización a la vez que modificará su estructura de costos, pero no la de sus ingresos. Dicho de otra manera, se busca incrementar la utilidad producto de la venta de maíz seco al comprar maíz tierno a un menor precio (reducir costos) y crear valor al realizar la operación de secado dentro de las instalaciones de la empresa.

La inversión³⁴ que representó la implementación de la operación de secado se presenta en la Tabla 5. 1:

³⁴ Alguna documentación respecto de los costos de la secadora se presenta en el Anexo A. 23.

Tabla 5. 1. Inversión secadora.

| Inversión secadora | | | |
|---------------------------|-------------|-------------|------------------|
| Equipo | Cant | P.U. | P.T. |
| Obras preliminares | 1 | 3.452,50 | 3.452,50 |
| Obra civil | 1 | 1.500,00 | 1.500,00 |
| Ventilador | 1 | 1.452,00 | 1.452,00 |
| Campana difusora | 1 | 183,00 | 183,00 |
| Quemador | 1 | 1.042,00 | 1.042,00 |
| Múltiple | 1 | 907,00 | 907,00 |
| Motor | 1 | 600,00 | 600,00 |
| Válvulas | 36 | 5,00 | 180,00 |
| Costos de instalación | 1 | 550,00 | 550,00 |
| Tanques de gas | 0 | 20,00 | - |
| Honorarios proyectistas | 1 | 1.000,00 | 1.000,00 |
| TOTAL | | | 10.866,50 |
| Referencia: Autores. | | | |

Los costos de la comercialización del maíz se presentan en la Tabla 5. 2:

Tabla 5. 2. Costos de operación comercialización maíz seco

| Costos de operación actuales | | | | |
|-------------------------------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| Descripción | Cant | Horas | P.U. | P.T. |
| Maíz húmedo | 400 | | 6,50 | 2.600,00 |
| Transporte | 400 | | 1,00 | 400,00 |
| Estibadores | | | | - |
| Operarios | - | | - | - |
| Combustible gas | - | - | - | - |
| Combustible diesel | - | - | - | - |
| TOTAL | | | | 3.000,00 |
| Costo unitario [USD/qq] | | | | 7,50 |
| Referencia: Autores. | | | | |

Para determinar la nueva estructura de costos es necesario determinar el costo de los combustibles utilizados en la operación de secado diesel y GLP. El consumo de gas se había establecido en , Los resultados se presentan en la Tabla 5. 3:

Tabla 5. 3. Nuevos Costos de operación

| Nuevos Costos de operación | | | | |
|-----------------------------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| Descripción | Cant | Horas | P.U. | P.T. |
| Maíz húmedo | 400 | | 5,60 | 2.240,00 |
| Transporte | 400 | | 1,00 | 400,00 |
| Estibadores | 0 | | 0,10 | - |
| Operarios | 4 | 11,1 | 2,00 | 88,80 |
| Combustible gas | 3 | 11,1 | 1,60 | 53,28 |
| Combustible diesel | 1,04 | 11,1 | 1,08 | 12,50 |
| TOTAL | | | | 2.794,58 |
| Costo unitario [USD/qq] | | | | 6,99 |
| Referencia: Autores. | | | | |

5.2. Análisis de ingresos

Los ingresos que genera el secado del maíz están dados por el precio de venta de cada quintal de maíz seco vendido. La operación de secado estándar se realiza con 400 [qq], con una frecuencia de dos (2) por semana³⁵ durante los meses de febrero, marzo, abril, mayo, agosto, septiembre, octubre y noviembre que son los meses de temporada de cosecha.

La Tabla 5. 4. muestra los ingresos totales percibidos por la compañía por concepto de comercialización de maíz, los valores mostrados se obtuvieron considerando una operación estándar de 400 [qq] con frecuencia de de 2 operaciones por semana, durante seis meses del año a un precio de 8,50 [USD/qq].

Tabla 5. 4. Flujo de efectivo considerando ingresos totales anuales.

| FLUJO NETO DE EFECTIVO | | | | |
|-------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Tiempo | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Ingresos | | 163.200,00 | 163.200,00 | 163.200,00 |
| Costos | | (144.000,00) | (144.000,00) | (144.000,00) |
| Inversión | (10.866,50) | - | - | - |
| Flujo de efectivo | 10.866,50) | 19.200,00 | 19.200,00 | 19.200,00 |
| Referencia: Autores. | | | | |

³⁵ Datos proporcionados por la Cía. Trans. Comercio Guerra Ayala.

5.3. Flujo de efectivo neto

La Tabla 5. 5 muestra el los flujos de efectivo anuales estimados tanto de la inversión como de los ingresos (ahorros esperados mediante la implementación de la operación de secado) y costos, se han omitido análisis de futuras variaciones del precio del quintal de maíz seco. En este caso los ingresos provienen de la nueva estructura de costos (Tabla 5. 3), es decir, del ahorro en costos resultante de la implementación de la operación de secado considerando la misma operación estándar de la Tabla 5.4 de 400 [qq] con frecuencia de 2 operaciones por semana, durante seis meses del año a un precio de 8,50 [USD/qq].

Tabla 5. 5. Flujo neto de efectivo anual de la operación de secado.

| FLUJO NETO DE EFECTIVO | | | | |
|-------------------------------|-------------|----------|----------|----------|
| Tiempo | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Ingresos (Ahorro costos) | | 9.860,28 | 9.860,28 | 9.860,28 |
| Inversión | (10.866,50) | - | - | - |
| Flujo de efectivo | (10.866,50) | 9.860,28 | 9.860,28 | 9.860,28 |
| Referencia: Autores. | | | | |

5.4. Índices financieros

Para evaluar los resultados económicos de la implementación de la secadora se calcularon los índices financieros esperados Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto.

El Valor Actual Neto representa la sumatoria de los flujos futuros de efectivo descontados a una tasa determinada, nosotros la fijamos en el 15% que actualmente es la tasa bancaria para financiamiento de capital de la empresa. Su cálculo se realizó mediante las Ec.5.1 y 5.2.

$$VAN = VAN_0 + VAN_1 + VAN_2 + \dots + VAN_n$$

Ecuación 5.1

$$VAN = \frac{FE_0}{(1+k)^0} + \frac{FE_1}{(1+k)^1} + \frac{FE_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+k)^n} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde:

$VA_i \rightarrow$ Valor actual (flujo descontado)

$FE_i \rightarrow$ Flujo de efectivo neto

$k \rightarrow$ Tasa de descuento (costos de capital)

$n \rightarrow$ Período

Reemplazando valores:

$$VAN = \frac{-10.866,50}{(1+0,15)^0} + \frac{9860,28}{(1+0,15)^1} + \frac{9860,28}{(1+0,15)^2} + \frac{9860,28}{(1+0,15)^3}$$

$$VAN = 11.646,73 \quad [USD]$$

Los resultados se presentan en la Tabla 5. 6:

Tabla 5. 6. Valor actual neto.

| VALOR ACTUAL NETO (VAN) | | | | |
|--------------------------------|-------------|----------|----------|------------------|
| Tasa de descuento | 0,15 | 15,00% | | |
| Tiempo | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Flujo de efectivo | (10.866,50) | 9.860,28 | 9.860,28 | 9.860,28 |
| Valor actual | (10.866,50) | 8.574,15 | 7.455,79 | 6.483,29 |
| Valor actual neto | | | | 11.646,73 |
| Referencia: Autores. | | | | |

Como se puede observar, desde este punto de vista, el proyecto planteado bajo estas condiciones es aceptable pues produce un VAN positivo de 11.646,73 [USD].

La Tasa Interna de Retorno representa la rentabilidad de los flujos invertidos en el proyecto con la finalidad de poder comparar sus resultados con otros proyectos u oportunidades de inversión de la empresa. Se calcula a partir de la ecuación 5.3:

$$VAN = 0 = \frac{FE_0}{(1+TIR)^0} + \frac{FE_1}{(1+TIR)^1} + \frac{FE_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+TIR)^n} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Donde:

$FE_i \rightarrow$ Flujo de efectivo neto

$TIR \rightarrow$ Tasa interna de rendimiento (rentabilidad)

$n \rightarrow$ Período

Reemplazando valores:

$$0 = \frac{-10.866,50}{(1+TIR)^0} + \frac{9860,28}{(1+TIR)^1} + \frac{9860,28}{(1+TIR)^2} + \frac{9860,28}{(1+TIR)^3}$$

$$TIR = 0,7331 = 73,31 \quad [\%]$$

Los resultados se presentan en la Tabla 5. 7:

Tabla 5. 7. Tasa interna de rendimiento (TIR) .

| TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-----------|----------|-------------|
| Tasa interna de retorno | 0,73 | 73,30841% | | |
| Tiempo | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Flujo de efectivo | (10.866,50) | 9.860,28 | 9.860,28 | 9.860,28 |
| Valor actual | (10.866,50) | 5.689,44 | 3.282,84 | 1.894,22 |
| Valor actual neto | | | | 0,00 |
| Referencia: Autores. | | | | |

Como observamos, además de ser un proyecto aceptable por tener VAN positivo, también representa una oportunidad de inversión altamente rentable, con una TIR del 73,31 [%] que es sumamente atractiva.

CONCLUSIONES

El objeto del presente proyecto es construir un sistema de calentamiento de aire a base de gas que permita disminuir el contenido de humedad inicial de 20 % a un contenido de humedad final del 14 % de una masa de grano de maíz amarillo de 30 [Ton] en un tiempo estimado de 11,1 [h] en una secadora de lecho estacionario (por tandas) ubicada en las instalaciones de la Cia. Guerra Ayala ubicadas en San Antonio de Pichincha.

El secado de los alimentos y cultivos como método de conservación es una de las técnicas de procesamiento más antiguas y efectivas que se conocen y practican hasta la actualidad. Su objetivo principal es garantizar la seguridad alimentaria. Existe una amplia variedad de productos cuyas características naturales permiten que sean sometidos a esta técnica tales como los cereales, que normalmente adquieren un valor agregado, lo que permite su comercialización. Existen múltiples clasificaciones de los secadores de acuerdo a criterios como su principio básico de funcionamiento, grado de aplicación tecnológica y método de trabajo. El presente proyecto analiza un secador por tandas, de lecho estacionario, con aplicación de sistemas de calentamiento y ventilación forzada.

Varias consideraciones de tipo técnico (volumen de producto, condiciones ambientales, características del grano) y económico (inversión, VAN, TIR) determinaron que la mejor alternativa para la Cía. Guerra Ayala es la implementación de un secador de lecho estacionario que tiene tres componentes principales: cámara de secado, sistema de calentamiento y sistema de ventilación forzada. La cámara de secado es la estructura que aloja el volumen de producto y realiza la distribución del aire de secado, consiste de una cámara de distribución de aire, chapa perforada y cámara de secado, cuya capacidad volumétrica y de carga máxima es 675 [q.q.] de maíz al granel con contenido de humedad inicial aproximado de 20%. El sistema de calentamiento es directo, utiliza GLP como combustible lo que permite realizar un calentamiento directo del aire, sin la utilización de intercambiadores de calor y sin el peligro de introducir residuos contaminantes que afecten la calidad del producto. Consiste de un quemador

tipo tobera de valor térmico máximo 2'400.000 [btu/h], alimentado por 28 cilindros de gas conectados simultáneamente a un múltiple de admisión y mangueras normalizadas ½" y ¾" de 300 [psi] con acoples rápidos, para realizar la operación en un tiempo de secado máximo de 11,1 [h]. El sistema de ventilación forzada consiste de un ventilador centrífugo de 17000 [cfm] a 4 ["c.d.a] cuya fuente de movimiento es un motor EC ISUZU C190, adaptado para reemplazar un motor eléctrico (de uso más generalizado), conectado mediante poleas de doble canal de diámetros 210 y 200 [mm] y 2 bandas tipo B - 60 de $L_p = 1560$ [mm]. El diseño de los sistemas y la selección de equipos y componentes se realizaron considerando las condiciones climáticas, del grano y de proceso más adversas para brindar confiabilidad del equipo y calidad del producto secado.

La instalación de la secadora fue afectada por diversos factores, entre los que se cuentan: los flujos de efectivo provenientes de la empresa para financiar la inversión y la inexistencia de redes de alimentación de energía para instalar equipos de alta potencia. La inversión total de la secadora asciende a 10.866,50 [USD], el volumen de ventas de la compañía que inicialmente no ha sufrido cambios se mantienen en 19.200 [qq] a un precio de 8,50 [USD] mientras que el costo unitario de cada quintal de maíz disminuyó de 7,50 [USD] a 6,99 [USD]. Con estos datos, se calcularon VAN de 11.646,73 [USD] que indica que la secadora es una inversión aceptable y TIR de 73,31% que indica que es una inversión sumamente rentable.

Se realizaron las pruebas del modelo matemático que sirvió como base para la selección de equipos comparando sus resultados con el comportamiento real de la secadora en funcionamiento. También se evaluó la calidad del producto en las cuatro operaciones de secado realizadas. Se encontró que los resultados del modelo matemático planteado son aplicables a las condiciones del proceso de secado, constituyen un buen estimador de las condiciones reales y una herramienta útil para el diseño de sistemas similares y la posterior selección de equipos. Así mismo se presentan los resultados de las pruebas de control de calidad que se presentan en diagramas de control de medias y diagramas de control de amplitudes, los cuales muestran que el proceso suministra un producto de calidad uniforme bajo los estándares apropiados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda la aplicación de técnicas de secado de alimentos como alternativa o complemento de bajo costo frente a otros sistemas de conservación y almacenamiento de productos de dimensiones comparables como la refrigeración, la congelación, la cadena de frío.

Se recomienda que durante las futuras operaciones de secado de maíz se realice el proceso de medición, tabulación y evaluación de resultados con diferentes condiciones de proceso a fin de complementar los estudios realizados.

Resultaría de gran importancia la validación del modelo matemático planteado aplicado a otros alimentos. Se recomienda la investigación complementaria de este proyecto utilizando la secadora para deshidratar otros cultivos como el arroz (de amplio consumo en nuestro país).

La aplicación de la técnica que tratamos en este proyecto es recomendable para solucionar el problema del almacenamiento de los alimentos por períodos superiores a su ciclo de vida después de la cosecha, en condiciones ambientales favorables.

Las técnicas de secado deben adaptarse a factores técnicos, económicos y sociales propios de cada localidad, por este motivo se recomienda la adaptación de esta investigación para aplicarla masivamente a la cadena productiva del sector de agrícola de nuestro país.

Se recomienda complementar a cualquier estudio técnico sobre sistemas de secado con un estudio económico – financiero, con el que se garantice que el valor agregado al producto para su comercialización cubra los costos del equipo por un periodo determinado después de que se han previsto los costos fijos, tales como la mano de obra, el combustible y las ganancias acordadas.

RESUMEN

El maíz es uno de los cereales de más amplio consumo en todo el mundo. Tiene tres aplicaciones posibles: alimento, forraje y materia prima para la industria. En la agricultura de subsistencia continúa siendo un cultivo alimentario básico, con técnicas de molienda se puede obtener harinas y una amplia variedad de alimentos. Como forraje se emplea para elaborar piensos (porción de alimento seco que se da al ganado) compuestos para aves de corral, cerdos y rumiantes. Con maíz fermentado se elaboran también algunas bebidas alcohólicas y los residuos de la planta de maíz se utilizan como base para extraer diversos productos químicos para mejorar los suelos.

El secado de los alimentos en la actualidad es el método más utilizado por millones de agroprocesadores en todo el mundo. Su objetivo es garantizar la seguridad alimentaria. Existe una amplia variedad de productos que son sometidos a esta técnica, tales como los cereales, que normalmente adquieren un valor agregado, lo que permite su comercialización. La Cía. Guerra Ayala requiere implementar el proceso de secado en sus instalaciones de San Antonio de Pichincha con la finalidad de maximizar sus utilidades al comprar grano húmedo, de menor precio, y vender grano seco, de mayor valor.

Todos los métodos de secado se han ido desarrollando debido a que resultaban convenientes o aceptables para determinadas condiciones ambientales. El proceso de secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y traspasarla al aire circundante. El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y, por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata más rápidamente.

Existen diversas clases de secadores, su clasificación obedece a criterios como el método de secado: tradicional o mejorado con tecnología, natural o artificial, por el

flujo del producto, entre otros. Este proyecto tiene como objetivo general diseñar e instalar un sistema de calentamiento de aire a base de gas junto con un sistema de ventilación forzada que permita disminuir el contenido de humedad aproximadamente del 20% al 13% en una masa de grano 400 qq de maíz amarillo en un tiempo estimado entre 8 y 12 horas de operación que se obtendrán en el diseño del sistema que se estudia.

Dentro de los objetivos específicos se han señalado el análisis de la teoría referente al proceso de secado de granos y la tecnología disponible en el medio, el diseño, selección e instalación de los sistemas de calentamiento de aire y de ventilación forzada y la realización de pruebas de evaluación del desempeño del sistema y de la calidad del producto.

Debido a factores que incluyen: las actuales prácticas de secado de la localidad (no existen), el volumen de material que debe ser secado (lotes de 400qq), las condiciones climáticas (muy variables), las características del material que va a secarse (maíz húmedo procedente del oriente), la disponibilidad de materia prima, la disponibilidad de combustibles (línea de alta tensión inexistentes) y los costos involucrados, diversidad de productos, comercialización y demanda de calidad (contenido de humedad de 13%), se escogió instalar un secador por tandas o conocido como secador de lecho estacionario con un sistema de calentamiento con combustible gas GLP y quemador tipo tobera, y sistema de ventilación forzada con ventilador centrífugo y motor EC. Se comprobó la utilidad de la obra civil instalada al inicio del proyecto (cámara de secado) verificando sus dimensiones y capacidad máxima de carga. Se determinaron variables de operación como la cantidad de calor requerida por el sistema, tiempo de operación y caudal de aire para dimensionar y seleccionar los componentes del sistema de calentamiento, determinando a la vez las condiciones que rigen el sistema de ventilación forzada.

Se diseño un programa de pruebas del proyecto para: validar el modelo matemático que fundamentó la selección de los equipos del secador y evaluar la calidad del proceso de secado.

Las pruebas de evaluación demostraron que el modelo matemático planteado es aplicable a las condiciones del proceso de secado, constituye un buen estimador de las condiciones reales y una herramienta útil para el diseño de sistemas similares y la posterior selección de equipos. Los resultados de las pruebas de control de calidad muestran que el proceso suministra un producto de calidad uniforme bajo los estándares requeridos por la industria y por la compañía.

El proyecto es aceptable y rentable para la compañía, (VAN positivo = 11.646,73 USD y TIR = 73,31%). Finalmente queremos resaltar la importancia del estudio de las técnicas de secado de alimentos en el país y su aplicación para desarrollar la actividad agrícola y esperamos que esta contribución pueda servir a la comunidad como incentivo para la investigación más profunda de un tema tan importante.

Los autores.

ANEXOS

ANEXO A. TABLAS E ILUSTRACIONES

| | |
|--|-----|
| ANEXO A. 1. DILATACIÓN GRADUAL | 262 |
| ANEXO A. 2. CONTRACCIÓN GRADUAL | 263 |
| ANEXO A. 3. DILATACIÓN SÚBITA | 264 |
| ANEXO A. 4. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MATERIALES | 265 |
| ANEXO A. 5. CURVAS DE RENDIMIENTO DE VARIOS MODELOS DE VENTILADORES BP - AL CON CAMPANA DIFUSORA. | 267 |
| ANEXO A. 6. CURVAS DE RENDIMIENTO DE VENTILADORES BP - AL CON CAMPANA DIFUSORA. | 268 |
| ANEXO A. 7. FACTOR DE SERVICIO (BANDAS)..... | 269 |
| ANEXO A. 8. CAPACIDAD TRANSMISIÓN BANDAS TIPO B | 270 |
| ANEXO A. 9. RELACIÓN DE TRANSMISIÓN | 271 |
| ANEXO A. 10. POTENCIA POR BANDA..... | 272 |
| ANEXO A. 11. TOLERANCIAS DE INSTALACIÓN Y FACTORES K DE CORRECCIÓN. | 273 |
| ANEXO A. 12. LONGITUDES ESTÁNDAR. | 274 |
| ANEXO A. 13. CURVA DE COMPORTAMIENTO DEL MOTOR ISUZU C 190..... | 275 |
| ANEXO A. 14. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MOTORES ISUZU | 276 |
| ANEXO A. 15. DISTRIBUCIÓN NORMAL..... | 278 |
| ANEXO A. 16. DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT..... | 279 |
| ANEXO A. 17. FACTORES PARA DIAGRAMAS DE CONTROL. | 280 |
| ANEXO A. 18. F1 – FORMATO DE REGISTRO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD | 281 |
| ANEXO A. 19. F2 - HOJA DE REGISTRO DE DATOS DEL PROCESO DE SECADO | 282 |
| ANEXO A. 20. F3 - HOJA DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE DE CÁLCULO | 283 |
| ANEXO A. 21. F4 - HOJA DE REGISTRO DE CONTENIDOS DE HUMEDAD INICIAL ϕ_1 | 284 |
| ANEXO A. 22. F5 - HOJA DE REGISTRO DE CONTENIDOS DE HUMEDAD FINAL ϕ_2 | 285 |
| ANEXO A. 23. DOCUMENTACIÓN COSTOS SECADORA. | 287 |

ANEXO B. PSICROMETRÍA DEL PROCESO DE SECADO

ANEXO C. PLANOS

ANEXO D. MANUAL DE OPERACIÓN

ANEXO E. REPORTES DE PRUEBAS

ANEXO F. FOTOGRAFÍAS

Anexo A. Tablas e ilustraciones

Anexo A. 1. Dilatación gradual

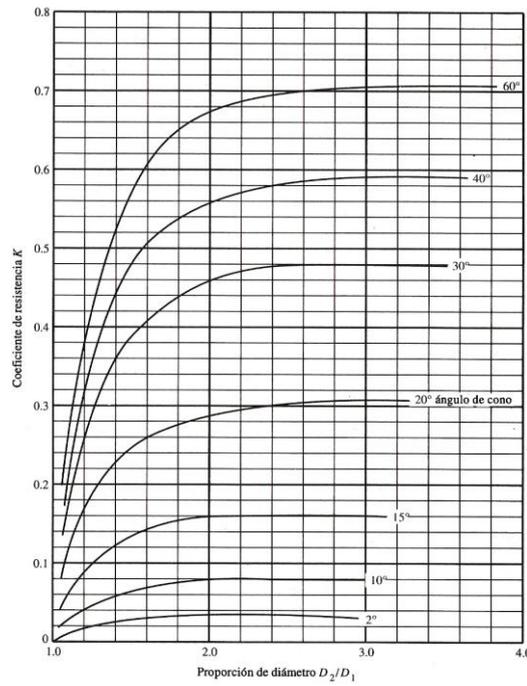
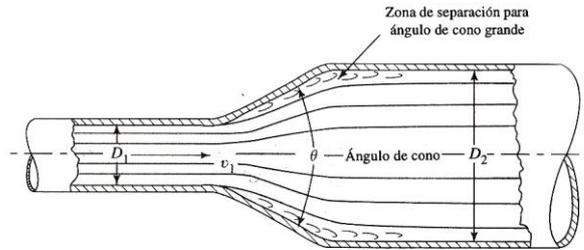


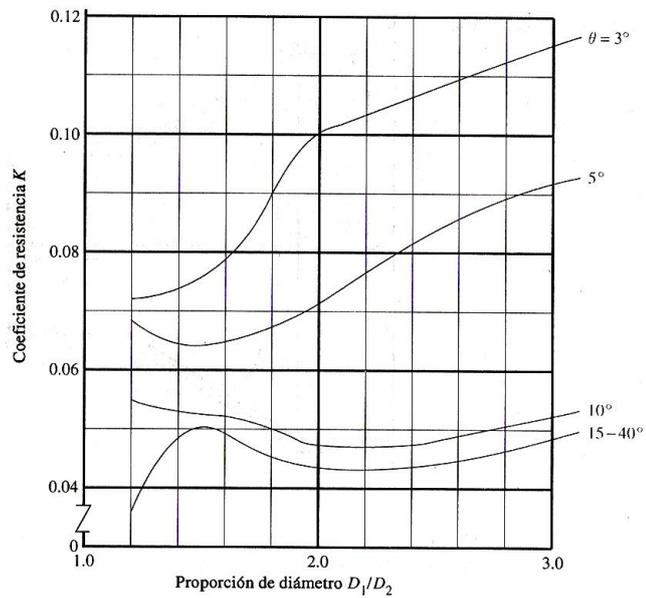
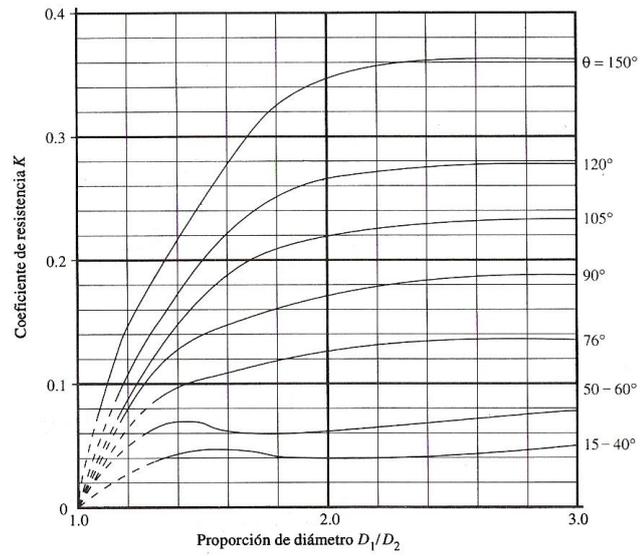
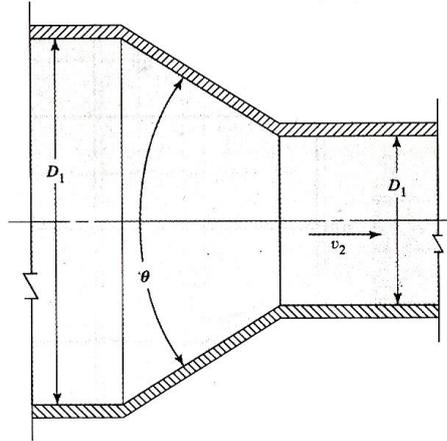
TABLA 10.2 Coeficiente de resistencia—dilatación gradual.

| D_2/D_1 | Ángulo del cono, θ | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2° | 6° | 10° | 15° | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° | 45° | 50° | 60° |
| 1.1 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.10 | 0.13 | 0.16 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.23 |
| 1.2 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.16 | 0.21 | 0.25 | 0.29 | 0.31 | 0.33 | 0.35 | 0.37 |
| 1.4 | 0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.12 | 0.23 | 0.30 | 0.36 | 0.41 | 0.44 | 0.47 | 0.50 | 0.53 |
| 1.6 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.14 | 0.26 | 0.35 | 0.42 | 0.47 | 0.51 | 0.54 | 0.57 | 0.61 |
| 1.8 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.15 | 0.28 | 0.37 | 0.44 | 0.50 | 0.54 | 0.58 | 0.61 | 0.65 |
| 2.0 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.16 | 0.29 | 0.38 | 0.46 | 0.52 | 0.56 | 0.60 | 0.63 | 0.68 |
| 2.5 | 0.03 | 0.04 | 0.08 | 0.16 | 0.30 | 0.39 | 0.48 | 0.54 | 0.58 | 0.62 | 0.65 | 0.70 |
| 3.0 | 0.03 | 0.04 | 0.08 | 0.16 | 0.31 | 0.40 | 0.48 | 0.55 | 0.59 | 0.63 | 0.66 | 0.71 |
| ∞ | 0.03 | 0.05 | 0.08 | 0.16 | 0.31 | 0.40 | 0.49 | 0.56 | 0.60 | 0.64 | 0.67 | 0.72 |

Fuente: King, H.W. y E.F. Brater, 1963. *Handbook of Hydraulics*, 5ª ed. Nueva York: McGraw-Hill. (Tabla 6-8.)

Anexo A. 2. Contracción gradual.

10.8 Contracción gradual



Anexo A. 3. Dilatación súbita

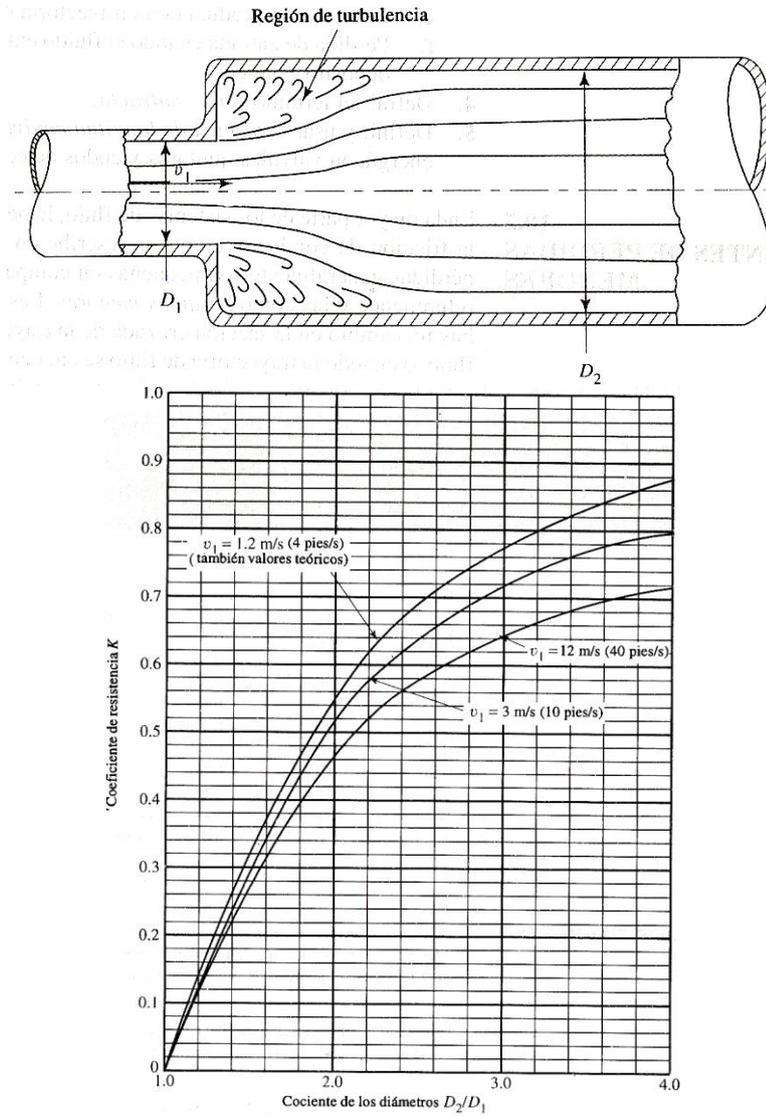


TABLA 10.1 Coeficiente de resistencia—dilatación súbita.

| D_2/D_1 | Velocidad, v_1 | | | | | | |
|-----------|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | 0.6 m/s 2 pies/s | 1.2 m/s 4 pies/s | 3 m/s 10 pies/s | 4.5 m/s 15 pies/s | 6 m/s 20 pies/s | 9 m/s 30 pies/s | 12 m/s 40 pies/s |
| 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 1.2 | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.08 |
| 1.4 | 0.26 | 0.25 | 0.23 | 0.22 | 0.22 | 0.21 | 0.20 |
| 1.6 | 0.40 | 0.38 | 0.35 | 0.34 | 0.33 | 0.32 | 0.32 |
| 1.8 | 0.51 | 0.48 | 0.45 | 0.43 | 0.42 | 0.41 | 0.40 |
| 2.0 | 0.60 | 0.56 | 0.52 | 0.51 | 0.50 | 0.48 | 0.47 |
| 2.5 | 0.74 | 0.70 | 0.65 | 0.63 | 0.62 | 0.60 | 0.58 |
| 3.0 | 0.83 | 0.78 | 0.73 | 0.70 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 4.0 | 0.92 | 0.87 | 0.80 | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 |
| 5.0 | 0.96 | 0.91 | 0.84 | 0.82 | 0.80 | 0.77 | 0.75 |
| 10.0 | 1.00 | 0.96 | 0.89 | 0.86 | 0.84 | 0.82 | 0.80 |
| ∞ | 1.00 | 0.98 | 0.91 | 0.88 | 0.86 | 0.83 | 0.81 |

Fuente: H. W. King y E. F. Brater. 1963. *Handbook of Hydraulics*, 5ª ed. Nueva York: McGraw-Hill. (Tabla 6-7. Velocidades convertidas a unidades SI.)

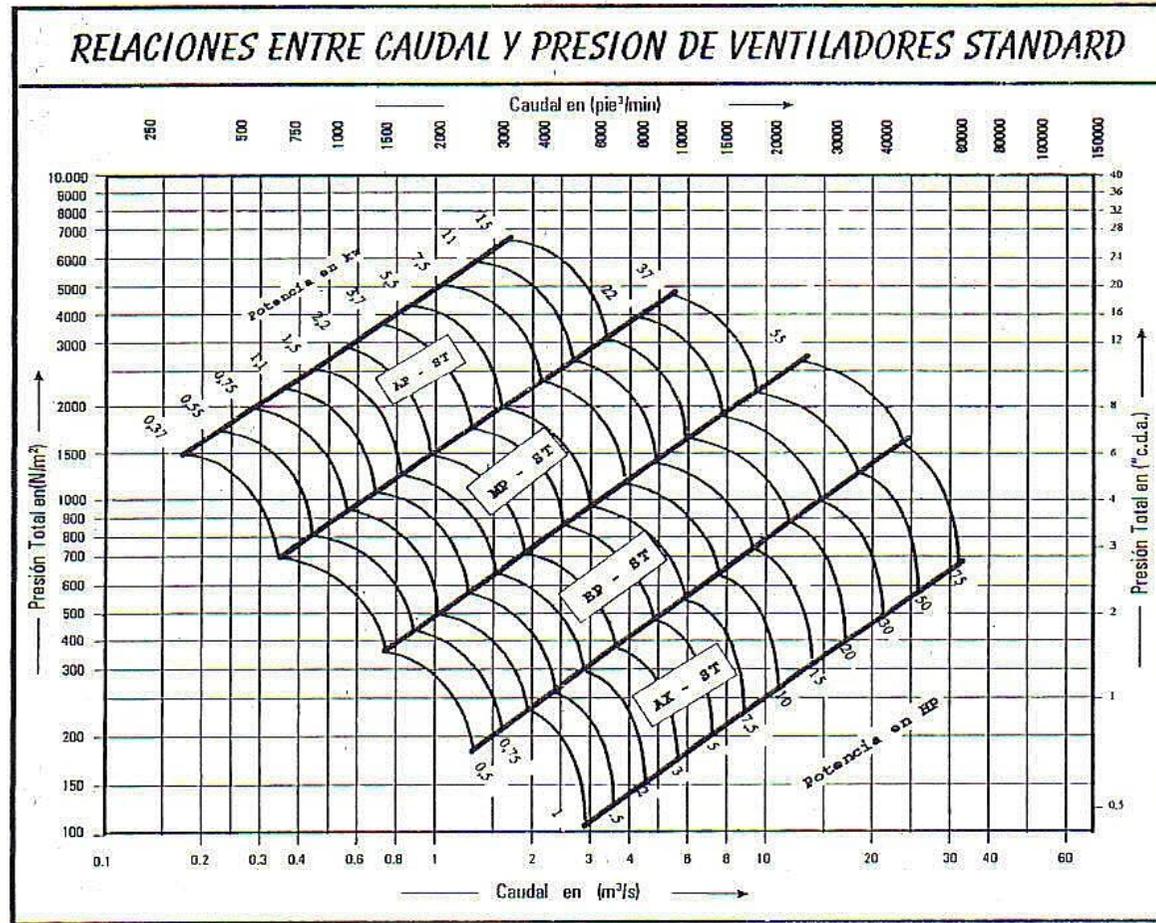
Anexo A. 4. Conductividad térmica materiales

TABLA 10-4 Conductividad térmica de materiales usados en paredes de almacenes fríos

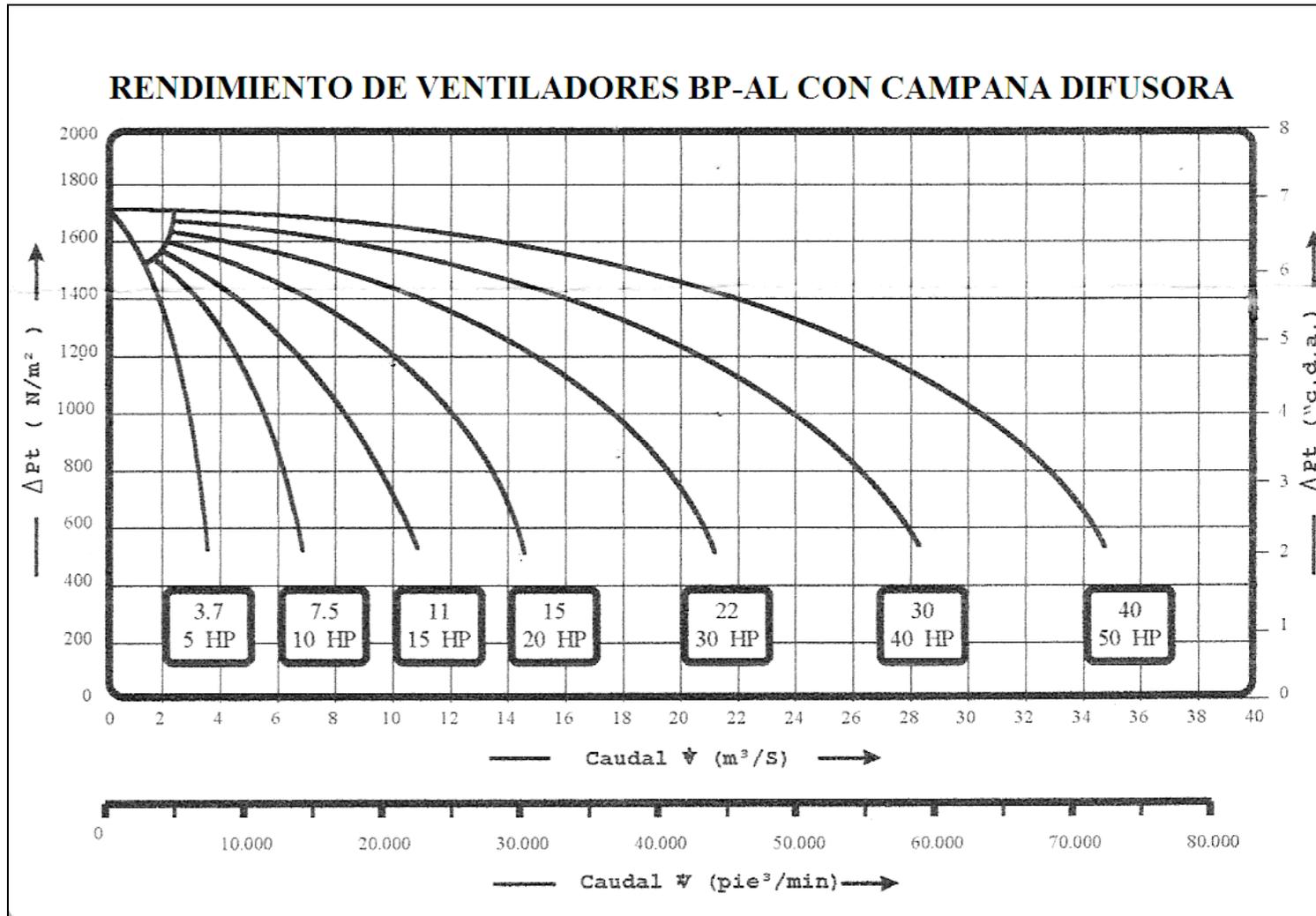
| Material | Descripción | Conductividad Térmica (k)* | Conductancia térmica (C)* |
|---|---|----------------------------------|---------------------------------|
| Mampostería | Ladrillo, común | 5.0 | |
| | Ladrillo, de fachada | 9.0 | |
| | Concreto mortero o mezcla | 5.0 | |
| | Concreto, agregado de arena | 12.0 | |
| | Bloque de concreto | | |
| | Agregado de arena 4 plg | | 1.40 |
| | Agregado de arena 8 plg | | 0.90 |
| | Agregado de arena 12 plg | | 0.78 |
| | Agregado de escoria 4 plg | | 0.90 |
| | Agregado de escoria 8 plg | | 0.58 |
| | Agregado de escoria 12 plg | | 0.53 |
| | Yeso de estucar 1/2 plg | | 3.12 |
| | Barro bloque hueco 4 plg | | 0.90 |
| | Barro bloque hueco 6 plg | | 0.66 |
| Barro bloque hueco 8 plg | | 0.54 | |
| Maderas | Arce, roble, maderas duras similares | | 1.10 |
| | Abeto, pino, maderas suaves similares | | 0.80 |
| | Madera contrachapada 1/2 plg | | 1.60 |
| | Madera contrachapada 3/4 plg | | 1.07 |
| Techado | Techado con rollo de asfalto | 6.50 | 0.15 |
| | Techado armado 3/8 plg | 3.00 | 0.33 |
| Materiales de aislamiento | Bloque o rollos de fibra, mineral o de vidrio | 0.27 | |
| | Tabla o placa | | |
| | Vidrio celular | 0.40 | |
| | Placa de corcho | 0.30 | |
| | Fibra de vidrio | 0.25 | |
| | Poliestireno expandido | 0.20 | |
| | Poliuretano expandido | 0.17 | |
| | Relleno | | |
| | Papel prensado o pulpa de madera | 0.27 | |
| | Aserrín o virutas | 0.45 | |
| Lana mineral (roca, vidrio, escoria) | 0.27 | | |
| Corteza de pino | 0.26 | | |
| Fibra de madera (madera suave) | 0.30 | | |
| Conductancia en la superficie (coeficiente de convección) | Aire tranquilo | | 1.65 |
| | Aire en movimiento (7.5 mph) | | 4.00 |
| | Aire en movimiento (15 mph) | | 6.00 |
| Vidrio | Una hoja | | 1.13 |
| | Dos hojas | | 0.46 |
| | Tres hojas | | 0.29 |
| | Cuatro hojas | | 0.21 |

De ASHRAE Data Book, Fundamentals Volume, Edición 1972 con permiso de the American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.

Anexo A. 5. Curvas de Rendimiento de varios modelos de Ventiladores BP - AL con Campana Difusora.



Anexo A. 6. Curvas de Rendimiento de Ventiladores BP - AL con Campana Difusora.



Anexo A. 7. Factor de servicio (Bandas)

Table 1. Service factor “K_d”

| Type of duty | Driven machine | Driving unit | | | Driving unit | | |
|--------------|---|---|-----|-------|--|-----|-----|
| | | <i>AC motors:</i> normal torque, single-phase and three-phase. Starting torque approx 150 % of full load. <i>DC motors:</i> shunt wound. <i>Internal combustion engines:</i> multi-cylinder over 600 rev/min. Operational hours per day (h/d) < 10 10-16 > 16 | | | <i>AC motors:</i> high torque, squirrel-cage, single- and three-phase, series wound and slip ring. Starting torque approx 200—250 % of full load. <i>DC motors:</i> series and compound wound. <i>Internal combustion engines:</i> single- and multi-cylinder under 600 rev/min. Line shafts Operational hours per day (h/d) < 10 10-16 > 16 | | |
| Light | Agitators for liquids Blowers and exhausters - small Centrifugal pumps and compressors Fans up to 7.4 kW Light duty conveyors | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.1 | 1.2 | 1.3 |
| Normal | Belt conveyors for sand, grain, etc. Dough mixers Fans over 7.4 kW Generators Line shafts Laundry machinery Machine tools Punches, presses and shears Printing machinery Positive displacement rotary pumps Vibrating and revolving screens | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.3 | 1.4 |
| Heavy | Brick machinery Bucket elevators Reciprocating compressors Conveyors (drag-panscrew) Hammer mills Papermill beaters Reciprocating pumps Positive displacement blowers Pulverizers Sawmill and woodworking machinery Textile machinery | 1.2 | 1.3 | 1.4 † | 1.4 | 1.5 | 1.6 |
| Extra-heavy | Crushers Mills (ball and rod) Heavy hoists Mills, calenders, etc. for the rubber and plastics industries | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 1.6 | 1.8 |

Table 2. Increments for service factor “K_d”

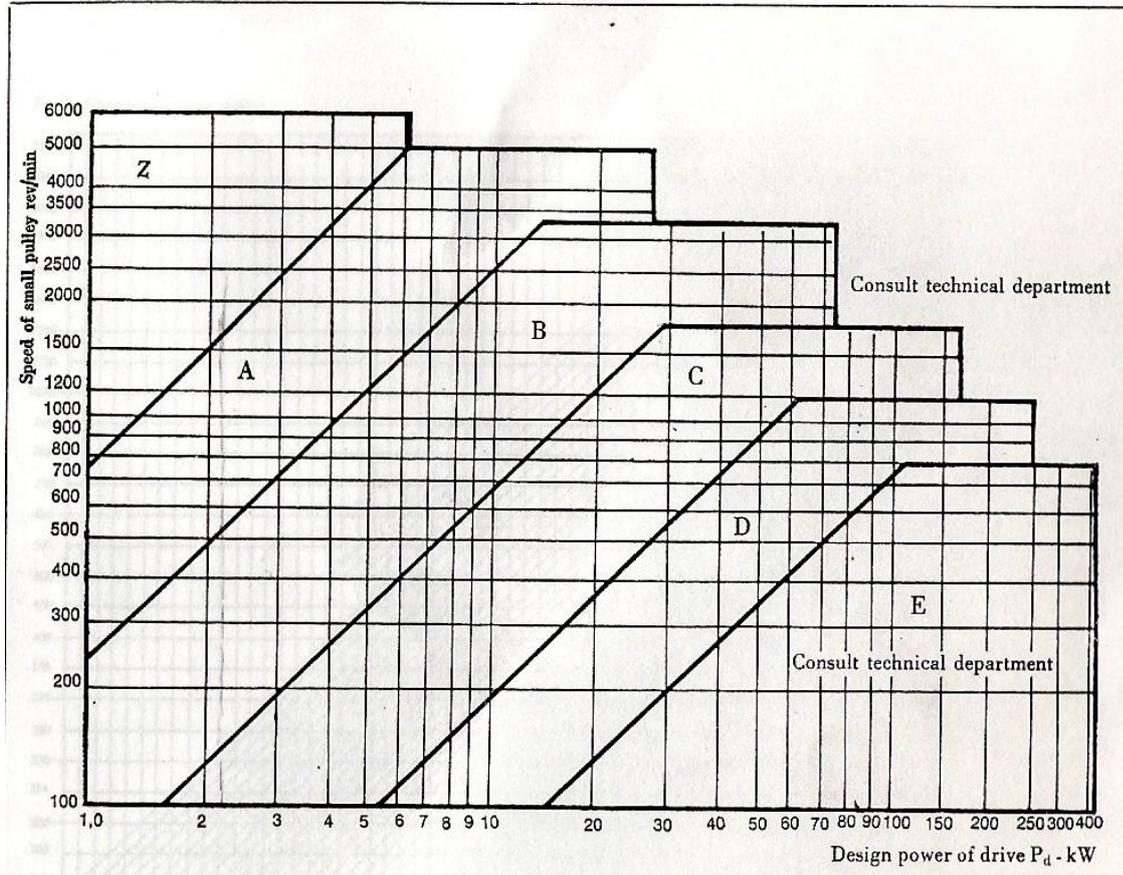
The classification of the nature of the load for the various duties set out above is given only as a guide and relates to normal operating conditions. The service factor may often have to be increased when the duty is affected by special factors such as:

| | | | |
|---|--|--|------------------------------|
| Idler roller on slack side of belt (inside) on slack side of belt (outside) on tight side of belt (inside) on tight side of belt (outside) excessive quantities of oil sand, gravel, dirt | ±0 +0.1 +0.1 +0.2 +0.1 +0.1 | Temperature up to 60°C 60°C — 75°C Speed-increasing ratios Humid conditions Water and liquids that do not damage rubber or fabric Alkalis — consult technical department Acids — consult technical department | ±0 +0.1 +0.1 +0.1 † |
|---|--|--|------------------------------|

Anexo A. 8. Capacidad transmisión bandas tipo B

Table 3. Selection of belt cross-section

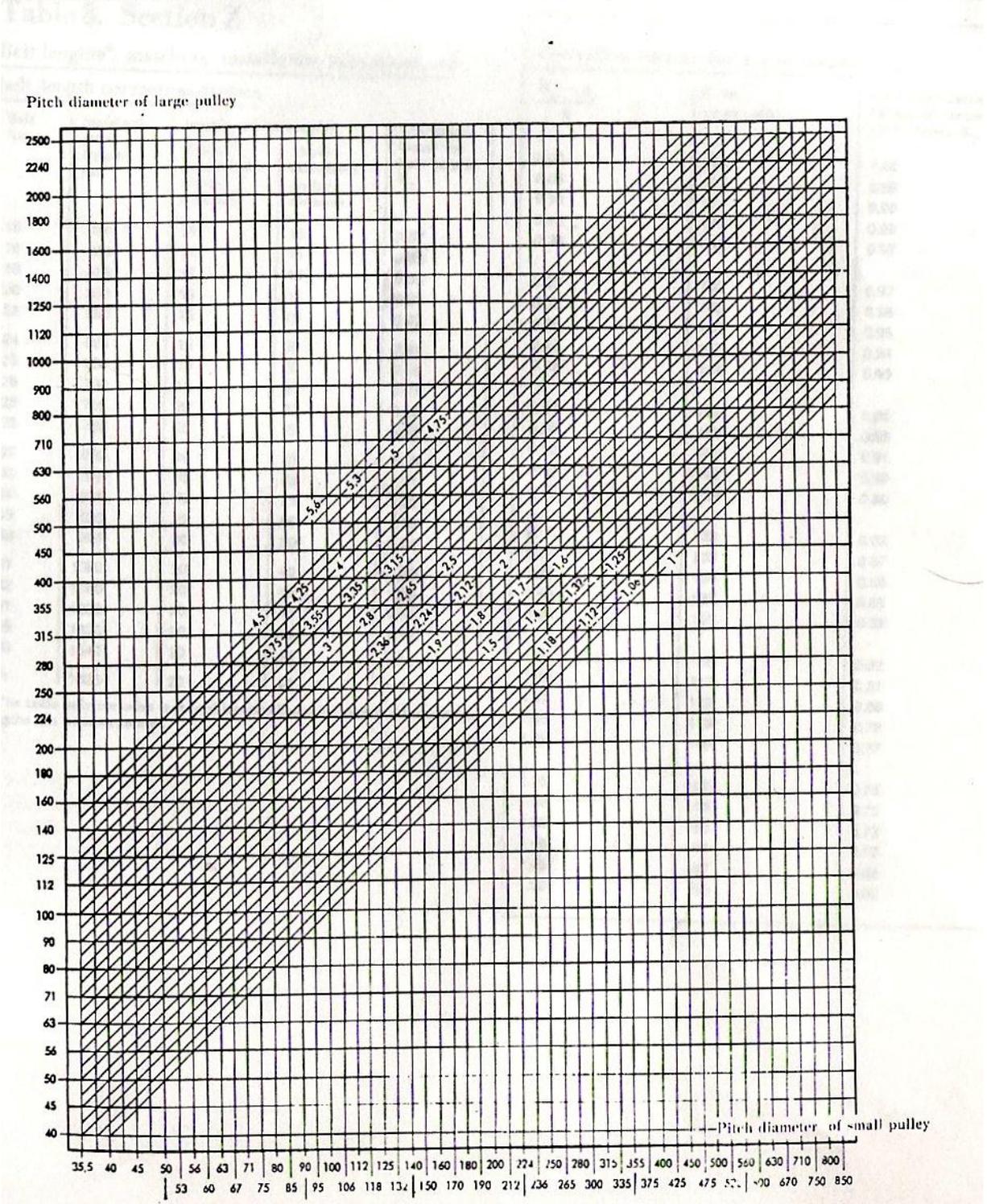
on the basis of design power and speed of small pulley



Anexo A. 9. Relación de transmisión

Table 6. Transmission ratio (i)

The chart shows the transmission ratio for a number of combinations of standard V-belt pulleys to BSS 1440/1971.

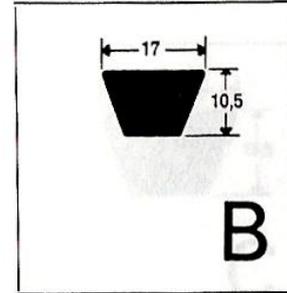


Anexo A. 10. Potencia por banda.

Table 11. Section B

Power per belt kW (Basic power)

| Rev/min of small pulley | Pitch diameter of small pulley, d_p , mm | | | | | | | | | |
|-------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| | 118 | 125 | 132 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 and over |
| 720 | 1,42 | 1,63 | 1,83 | 2,01 | 2,23 | 2,51 | 2,75 | 2,99 | 3,23 | 3,48 |
| 960 | 1,81 | 2,06 | 2,27 | 2,53 | 2,84 | 3,16 | 3,46 | 3,75 | 4,07 | 4,34 |
| 1 440 | 2,38 | 2,72 | 3,08 | 3,43 | 3,85 | 4,31 | 4,69 | 5,14 | 5,51 | 5,95 |
| 2 880 | 3,39 | 3,99 | 4,47 | 5,01 | 5,58 | 6,14 | 6,68 | 7,09 | 7,47 | |
| 200 | 0,52 | 0,58 | 0,64 | 0,70 | 0,79 | 0,87 | 0,95 | 1,03 | 1,11 | 1,19 |
| 400 | 0,91 | 1,02 | 1,13 | 1,25 | 1,40 | 1,56 | 1,71 | 1,86 | 2,00 | 2,16 |
| 600 | 1,25 | 1,41 | 1,56 | 1,74 | 1,96 | 2,18 | 2,40 | 2,61 | 2,83 | 3,04 |
| 800 | 1,56 | 1,76 | 1,96 | 2,19 | 2,48 | 2,76 | 3,04 | 3,31 | 3,58 | 3,86 |
| 1000 | 1,84 | 2,09 | 2,33 | 2,61 | 2,95 | 3,29 | 3,63 | 3,96 | 4,28 | 4,61 |
| 1200 | 2,10 | 2,39 | 2,67 | 3,00 | 3,39 | 3,79 | 4,17 | 4,55 | 4,93 | 5,30 |
| 1400 | 2,34 | 2,66 | 2,99 | 3,35 | 3,80 | 4,24 | 4,67 | 5,10 | 5,51 | 5,92 |
| 1600 | 2,55 | 2,92 | 3,27 | 3,68 | 4,17 | 4,65 | 5,13 | 5,59 | 6,04 | 6,47 |
| 1800 | 2,75 | 3,14 | 3,53 | 3,97 | 4,50 | 5,02 | 5,53 | 6,02 | 6,49 | 6,95 |
| 2000 | 2,92 | 3,35 | 3,76 | 4,23 | 4,80 | 5,35 | 5,88 | 6,39 | 6,88 | 7,35 |
| 2200 | 3,07 | 3,52 | 3,96 | 4,45 | 5,05 | 5,62 | 6,17 | 6,69 | 7,18 | 7,65 |
| 2400 | 3,19 | 3,67 | 4,13 | 4,64 | 5,26 | 5,84 | 6,40 | 6,92 | 7,41 | 7,86 |
| 2600 | 3,29 | 3,79 | 4,27 | 4,79 | 5,42 | 6,01 | 6,57 | 7,08 | 7,55 | 7,98 |
| 2800 | 3,37 | 3,88 | 4,37 | 4,90 | 5,54 | 6,12 | 6,66 | 7,15 | 7,59 | 7,98 |
| 3000 | 3,42 | 3,94 | 4,43 | 4,97 | 5,60 | 6,17 | 6,69 | 7,15 | 7,54 | |
| 3200 | 3,43 | 3,96 | 4,46 | 5,00 | 5,61 | 6,16 | 6,64 | 7,05 | | |
| 3400 | 3,42 | 3,95 | 4,45 | 4,97 | 5,56 | 6,07 | 6,51 | | | |
| 3600 | 3,38 | 3,91 | 4,39 | 4,90 | 5,45 | 5,92 | | | | |
| 3800 | 3,31 | 3,82 | 4,29 | 4,77 | 5,28 | | | | | |
| 4000 | 3,20 | 3,70 | 4,15 | 4,59 | | | | | | |
| 4200 | 3,06 | 3,54 | 3,96 | | | | | | | |
| 4400 | 2,89 | 3,33 | | | | | | | | |
| 4600 | 2,67 | 3,09 | | | | | | | | |
| 4800 | 2,41 | | | | | | | | | |



Belt speeds over 30 m/s.
The pulleys should be dynamically balanced.

Additional power

| Rev/min of small pulley | Additional power per belt kW for various transmission ratios | | | | | | | | | |
|-------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| | 1.00-1.01 | 1.02-1.04 | 1.05-1.08 | 1.09-1.12 | 1.13-1.18 | 1.19-1.24 | 1.25-1.34 | 1.35-1.51 | 1.52-1.99 | 2.00 and over |
| 720 | 0,00 | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,20 | 0,23 |
| 960 | 0,00 | 0,03 | 0,07 | 0,10 | 0,14 | 0,17 | 0,20 | 0,24 | 0,27 | 0,30 |
| 1 440 | 0,00 | 0,05 | 0,12 | 0,17 | 0,22 | 0,27 | 0,33 | 0,38 | 0,43 | 0,49 |
| 2 880 | 0,00 | 0,11 | 0,21 | 0,31 | 0,42 | 0,55 | 0,66 | 0,76 | 0,87 | 0,98 |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,07 |
| 400 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,13 |
| 600 | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 |
| 800 | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,24 | 0,27 |
| 1000 | 0,00 | 0,04 | 0,08 | 0,11 | 0,15 | 0,19 | 0,23 | 0,26 | 0,30 | 0,34 |
| 1200 | 0,00 | 0,05 | 0,09 | 0,14 | 0,18 | 0,23 | 0,27 | 0,32 | 0,36 | 0,41 |
| 1400 | 0,00 | 0,05 | 0,11 | 0,16 | 0,21 | 0,26 | 0,32 | 0,37 | 0,42 | 0,48 |
| 1600 | 0,00 | 0,06 | 0,12 | 0,18 | 0,24 | 0,30 | 0,36 | 0,42 | 0,48 | 0,54 |
| 1800 | 0,00 | 0,07 | 0,14 | 0,20 | 0,27 | 0,34 | 0,41 | 0,48 | 0,54 | 0,61 |
| 2000 | 0,00 | 0,08 | 0,15 | 0,23 | 0,30 | 0,38 | 0,45 | 0,53 | 0,61 | 0,68 |
| 2200 | 0,00 | 0,08 | 0,17 | 0,25 | 0,33 | 0,42 | 0,50 | 0,58 | 0,67 | 0,75 |
| 2400 | 0,00 | 0,09 | 0,18 | 0,27 | 0,36 | 0,45 | 0,54 | 0,64 | 0,73 | 0,82 |
| 2600 | 0,00 | 0,10 | 0,20 | 0,29 | 0,39 | 0,49 | 0,59 | 0,69 | 0,79 | 0,89 |
| 2800 | 0,00 | 0,11 | 0,21 | 0,31 | 0,42 | 0,53 | 0,64 | 0,74 | 0,85 | 0,95 |
| 3000 | 0,00 | 0,11 | 0,23 | 0,34 | 0,45 | 0,57 | 0,68 | 0,79 | 0,91 | 1,02 |
| 3200 | 0,00 | 0,12 | 0,24 | 0,36 | 0,48 | 0,61 | 0,73 | 0,84 | 0,97 | 1,09 |
| 3400 | 0,00 | 0,13 | 0,26 | 0,39 | 0,51 | 0,64 | 0,77 | 0,90 | 1,03 | 1,16 |
| 3600 | 0,00 | 0,14 | 0,27 | 0,41 | 0,54 | 0,68 | 0,82 | 0,95 | 1,09 | 1,23 |
| 3800 | 0,00 | 0,14 | 0,29 | 0,43 | 0,57 | 0,72 | 0,86 | 1,00 | 1,15 | 1,29 |
| 4000 | 0,00 | 0,15 | 0,30 | 0,45 | 0,61 | 0,76 | 0,91 | 1,06 | 1,21 | 1,36 |
| 4200 | 0,00 | 0,16 | 0,32 | 0,48 | 0,64 | 0,79 | 0,95 | 1,11 | 1,27 | 1,43 |
| 4400 | 0,00 | 0,17 | 0,33 | 0,50 | 0,67 | 0,83 | 1,00 | 1,16 | 1,33 | 1,50 |
| 4600 | 0,00 | 0,17 | 0,35 | 0,52 | 0,70 | 0,87 | 1,04 | 1,22 | 1,39 | 1,57 |
| 4800 | 0,00 | 0,18 | 0,36 | 0,54 | 0,73 | 0,91 | 1,09 | 1,27 | 1,45 | 1,63 |

Anexo A. 11. Tolerancias de instalación y factores K de corrección.

Table 12. Section B

Belt lengths*), matching, installation tolerances and belt length correction factors

| Belt No. | Standard pitch length ¹⁾ , mm | Installation tolerances | | Correction factor for belt length K ₁ |
|----------|--|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | Below calculated centre distance | Above calculated centre distance | |
| 35 | 930 | 25 | 25 | 0.83 |
| 38 | 1000 | 25 | 25 | 0.84 |
| 42 | 1100 | 25 | 40 | 0.85 |
| 46 | 1210 | 25 | 40 | 0.87 |
| 51 | 1340 | 25 | 40 | 0.89 |
| 55 | 1440 | 25 | 40 | 0.90 |
| 60 | 1560 | 25 | 40 | 0.93 |
| 64 | 1670 | 30 | 50 | 0.94 |
| 68 | 1760 | 30 | 50 | 0.95 |
| 71 | 1850 | 30 | 50 | 0.95 |
| 75 | 1950 | 30 | 50 | 0.97 |
| 78 | 2020 | 30 | 50 | 0.98 |
| 80 | 2070 | 30 | 50 | 0.99 |
| 85 | 2200 | 30 | 50 | 1.00 |
| 90 | 2330 | 30 | 50 | 1.01 |
| 97 | 2500 | 30 | 65 | 1.03 |
| 105 | 2700 | 30 | 65 | 1.04 |
| 112 | 2890 | 30 | 65 | 1.05 |
| 120 | 3090 | 30 | 65 | 1.06 |
| 128 | 3290 | 30 | 75 | 1.08 |
| 136 | 3500 | 30 | 75 | 1.09 |
| 144 | 3700 | 30 | 75 | 1.11 |
| 158 | 4050 | 30 | 75 | 1.13 |
| 162 | 4160 | 30 | 90 | 1.14 |
| 173 | 4430 | 30 | 90 | 1.15 |
| 180 | 4610 | 30 | 90 | 1.15 |
| 195 | 5000 | 30 | 90 | 1.18 |
| 210 | 5370 | 40 | 100 | 1.19 |
| 238 | 6070 | 40 | 100 | 1.22 |

Correction factors for arc of contact

| $\frac{D_p - d_p}{a}$ | β for small pulley | Correction factor for arc of contact (V-V. drive) K ₂ |
|-----------------------|--------------------------|--|
| 0.00 | 180 | 1.00 |
| 0.05 | 177 | 0.99 |
| 0.10 | 174 | 0.99 |
| 0.15 | 171 | 0.98 |
| 0.20 | 169 | 0.97 |
| 0.25 | 166 | 0.97 |
| 0.30 | 163 | 0.96 |
| 0.35 | 160 | 0.95 |
| 0.40 | 157 | 0.94 |
| 0.45 | 154 | 0.93 |
| 0.50 | 151 | 0.93 |
| 0.55 | 148 | 0.92 |
| 0.60 | 145 | 0.91 |
| 0.65 | 142 | 0.90 |
| 0.70 | 139 | 0.89 |
| 0.75 | 136 | 0.88 |
| 0.80 | 133 | 0.87 |
| 0.85 | 130 | 0.86 |
| 0.90 | 127 | 0.85 |
| 0.95 | 123 | 0.83 |
| 1.00 | 120 | 0.82 |
| 1.05 | 117 | 0.81 |
| 1.10 | 113 | 0.80 |
| 1.15 | 110 | 0.78 |
| 1.20 | 106 | 0.77 |
| 1.25 | 103 | 0.75 |
| 1.30 | 99 | 0.73 |
| 1.35 | 95 | 0.72 |
| 1.40 | 91 | 0.70 |
| 1.45 | 87 | 0.68 |
| 1.50 | 83 | 0.65 |

Standard pitch lengths to British standards

¹⁾ Standard pitch length, see pages 6 & 7.

^{*)} The table only includes a nominal range of lengths. Correction factors for non-standard lengths can be interpolated.

Anexo A. 12. Longitudes estándar.

Standard lengths for HP-E V-belts

The Trelleborg standard range includes all British Standard lengths. The length tolerances for each belt are in accordance with BSS.1440-1971.

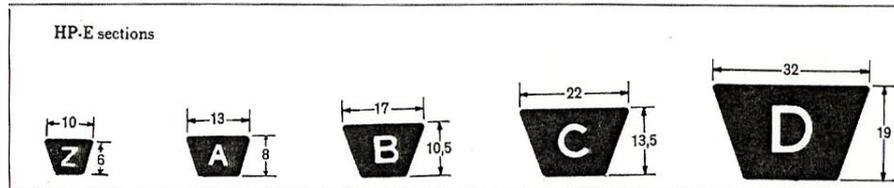


Fig. 4

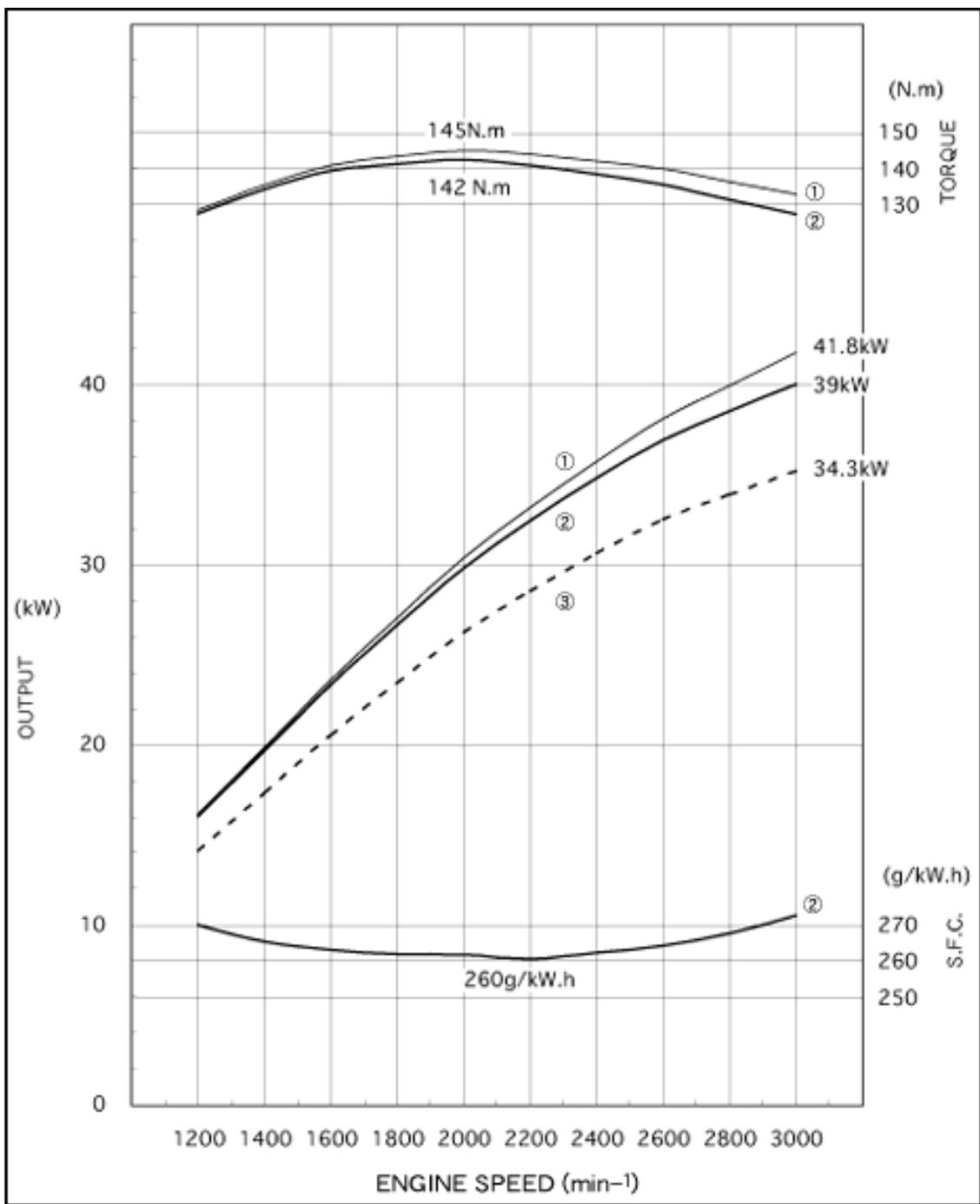
| Belt No. | Pitch length mm. | | | | Belt No. | Pitch length mm. | | | |
|----------|------------------|------|------|------|----------|------------------|------|------|------|
| | Z | A | B | C | | Z | A | B | C |
| 15 | 405 | — | — | — | 50 | — | 1300 | 1310 | — |
| 16 | 430 | — | — | — | 51 | 1330 | 1330 | 1340 | 1350 |
| 17 | — | — | — | — | 52 | — | 1360 | 1370 | — |
| 18 | 475 | — | — | — | 53 | — | 1380 | 1390 | — |
| 19 | — | — | — | — | 54 | — | 1410 | 1410 | — |
| 20 | 530 | 540 | — | — | 55 | 1420 | 1430 | 1440 | 1450 |
| 21 | — | 570 | — | — | 56 | — | 1460 | 1460 | 1480 |
| 22 | 580 | 590 | — | — | 57 | — | 1480 | 1490 | — |
| 23 | — | 620 | — | — | 58 | — | 1510 | 1510 | — |
| 24 | 625 | 640 | 650 | — | 59 | — | 1530 | 1540 | — |
| 25 | 655 | 670 | — | — | 60 | 1540 | 1550 | 1560 | 1580 |
| 26 | 700 | 700 | — | — | 61 | — | 1580 | 1590 | — |
| 27 | — | 720 | 726 | — | 62 | — | 1610 | 1620 | — |
| 28 | 735 | 740 | 750 | — | 63 | — | 1640 | 1640 | — |
| 29 | — | 770 | — | — | 64 | — | 1660 | 1670 | — |
| 30 | 780 | 790 | 800 | — | 65 | — | 1690 | 1690 | 1700 |
| 31 | — | 820 | 830 | — | 66 | — | 1710 | 1720 | — |
| 32 | 840 | 850 | 860 | — | 67 | — | 1740 | 1740 | — |
| 33 | 855 | 870 | 880 | — | 68 | — | 1760 | 1760 | 1780 |
| 34 | — | 890 | 910 | — | 69 | — | 1790 | 1800 | — |
| 35 | 920 | 920 | 930 | — | 70 | — | 1810 | 1820 | 1830 |
| 36 | 935 | 950 | 960 | — | 71 | 1825 | 1840 | 1850 | 1860 |
| 37 | — | 970 | 980 | — | 72 | — | 1860 | 1870 | 1880 |
| 38 | 995 | 990 | 1000 | — | 73 | — | 1890 | 1900 | — |
| 39 | — | 1020 | 1030 | — | 74 | — | 1920 | 1920 | — |
| 40 | — | 1050 | 1060 | — | 75 | — | 1940 | 1950 | 1950 |
| 41 | 1060 | 1070 | 1080 | — | 76 | — | 1960 | 1970 | 1990 |
| 42 | 1080 | 1100 | 1100 | — | 77 | — | 1990 | 2000 | 2010 |
| 43 | — | 1130 | 1130 | — | 78 | — | 2020 | 2020 | 2040 |
| 44 | — | 1150 | 1160 | — | 79 | — | 2050 | 2050 | — |
| 45 | — | 1180 | 1180 | — | 80 | — | 2070 | 2070 | 2090 |
| 46 | — | 1200 | 1210 | — | 81 | — | 2090 | 2100 | 2110 |
| 47 | — | 1230 | 1240 | — | 82 | — | 2120 | 2130 | 2140 |
| 48 | — | 1250 | 1260 | 1275 | 83 | — | 2140 | 2150 | 2170 |
| 49 | — | 1280 | 1290 | — | 84 | — | 2170 | 2180 | — |

Standard lengths (cont'd)

| Belt No. | Pitch length mm. | | | | Belt No. | Pitch length mm. | | | |
|----------|------------------|------|------|------|----------|------------------|------|------|-------|
| | A | B | C | D | | A | B | C | D |
| 85 | 2200 | 2200 | 2200 | — | 136 | 3490 | 3500 | 3520 | 3530 |
| 86 | 2220 | 2230 | — | — | 138 | — | 3550 | 3565 | — |
| 87 | 2240 | 2250 | — | — | 140 | 3590 | 3600 | — | — |
| 88 | 2270 | 2280 | — | — | 144 | 3690 | 3700 | 3710 | 3730 |
| 89 | 2300 | 2300 | — | — | 148 | — | 3790 | — | — |
| 90 | 2320 | 2330 | 2340 | — | 150 | — | 3850 | 3870 | 3885 |
| 91 | 2350 | 2350 | — | — | 154 | 3940 | 3950 | 3970 | 4000 |
| 92 | 2370 | 2380 | 2400 | — | 158 | 4040 | 4050 | 4060 | — |
| 93 | 2400 | 2400 | 2420 | — | 162 | 4140 | 4160 | 4170 | 4190 |
| 94 | 2420 | 2430 | 2450 | — | 173 | — | 4430 | 4450 | 4470 |
| 95 | 2450 | 2460 | 2475 | — | 180 | 4600 | 4610 | 4630 | 4650 |
| 96 | 2480 | 2480 | 2490 | — | 195 | — | 5000 | 5010 | 5030 |
| 97 | 2500 | 2500 | — | — | 204 | — | 5220 | 5240 | — |
| 98 | 2520 | 2530 | — | — | 210 | — | 5370 | 5380 | 5400 |
| 100 | 2570 | 2580 | 2600 | — | 220 | — | 5640 | 5650 | — |
| 102 | 2630 | 2630 | 2650 | — | 228 | — | — | 5850 | 5870 |
| 103 | 2650 | 2660 | — | — | 238 | — | 6070 | 6100 | 6120 |
| 105 | 2700 | 2700 | 2720 | — | 258 | — | — | — | 6630 |
| 108 | 2780 | 2790 | 2800 | 2820 | 268 | — | 6850 | 6860 | 6890 |
| 110 | 2830 | 2840 | 2850 | — | 298 | — | — | 7620 | 7650 |
| 112 | 2880 | 2890 | 2900 | 2920 | 330 | — | — | — | 8460 |
| 114 | 2930 | 2940 | 2950 | — | 336 | — | — | — | 8610 |
| 118 | — | 3040 | 3060 | — | 358 | — | — | 9150 | 9170 |
| 120 | 3080 | 3090 | 3100 | 3130 | 418 | — | — | — | 10700 |
| 124 | 3190 | 3200 | 3210 | — | 478 | — | — | — | 12200 |
| 128 | 3290 | 3290 | 3310 | 3330 | 538 | — | — | — | 13700 |
| 130 | — | 3350 | 3360 | — | 598 | — | — | — | 15200 |
| 132 | 3390 | 3400 | — | — | 658 | — | — | — | 16800 |

Belts above 210" inside length are normally branded with mean length 2" longer than inside length

Anexo A. 13. Curva de comportamiento del motor ISUZU C 190



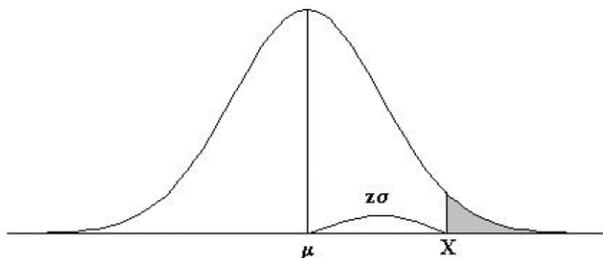
Anexo A. 14.Especificaciones técnicas Motores ISUZU

| Especificaciones técnicas Motores ISUZU | | | |
|--|--|-------------|--------------|
| Engine Model | C190 | 4JG1 | 4JG1T |
| Engine Characteristics | 4Cycle, Water Cooled, Vertical In-Line | | |
| Valvetrain Configuration | Over Head Valve | | |
| Type of Aspiration | Naturally Aspirated | | Turbocharged |
| Type of Injection | Indirect | Direct | Direct |
| No. of cilindres | 4 | 4 | 4 |
| Bore x Stroke (mm) | 86 x 102 | 95.4 x 107 | 95.4 x 107 |
| Displacement (Lit) | 2.369 | 3.059 | 3.059 |
| Compression ratio | 20 to 1 | 18.6 to 1 | 18.1 to 1 |
| Firing Order | 1-3-4-2 | 1-3-4-2 | 1-3-4-2 |
| Overall Dimensions | | | |
| Length (mm) | 800 | 791.5 | 787 |
| Width (mm) | 529 | 605.5 | 594.5 |
| Height(mm) | 694 | 708.5 | 778.5 |
| Dry Weight (kg) | 223 | 225 | 240 |
| Industrial Power | | | |
| Gross (SAE J1995) | | | |
| Max. Rated Output(kW/min-1) | 41.8 / 3000 | 48.0 / 2500 | 63.0 / 2500 |
| Max. Torque (N.m) | 145 | 205 | 265 |
| Net Performance (ISO 3046) | | | |
| Max. Rated Output(kW/min-1) | 39.0 / 3000 | 46.0 / 2500 | 61.0 / 2500 |
| Max. Torque (N.m) | 142 | 198 | 259 |
| Min.S.F.C(@Full Load)(g/kW.h) | 260 | 222 | 220 |
| Generator Set Power (Net) | | | |
| 1500rpm Stand-by (kW/min-1) | 21.0 | 28.6 | 37.0 |
| 1500rpm Prime (kW) | 19.1 | 23.4 | 32.8 |
| 1800rpm Stand-by (kW/min-1) | 25.8 | 35.7 | 46.3 |
| 1800rpm Prime (kW) | 23.2 | 29.2 | 41.0 |
| Condition of Net power | | | |
| Cooling Fan (ϕ mm) | 380 | 380 | 400 |
| Intake Depression (kPa) | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Exhaust Back Pressure (kPa) | 0 | 0 | 0 |
| Lubrication System | | | |
| Lubrication System | Full forced pressure feed type | | |
| Oil Pump | Trochid type, gear driven from camshaft | | |
| Lub. Oil Capacity(Oil Pan Only)(Lit) | 8.0 | 9.6 | 9.6 |
| Type of Lubrication Oil | API CC or CD | | API CD |
| Cooling System | | | |
| Cooling System | Water circulation type by pressurized | | |
| | Centrifugal vane type by vee belt driven | | |
| Coolant Capacity (Engine only)(Lit) | 5.2 | 4.5 | 4.5 |

| | | | |
|--|--|---------|---------|
| Fuel System | By plunger and nozzle,High pressure solid inj.type | | |
| Injection Pump | Zexel make,In-line Bosch A type | | |
| Governor | RSV Variable speed control mechanical governor | | |
| Type of Fuel | Diesel fuel(SEA 2D Type) | | |
| Electric System | Negative grounding system, 12V | | |
| Starting Aid | Glow plug | | |
| Starter Motor (V-kW) | 12-2.2 | 12-2.2 | 12-2.2 |
| Alternator (V-A) | 12 – 35 | 12 - 35 | 12 – 35 |
| Battery Requirements | | | |
| Size (V-CCA) | 12-580 | 12-580 | 12-650 |
| Quantity | 1 | 1 | 1 |
| Referencia: Fabricante. www.isuzu.com | | | |

Anexo A. 15. Distribución Normal.

Áreas bajo la curva normal



Ejemplo:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

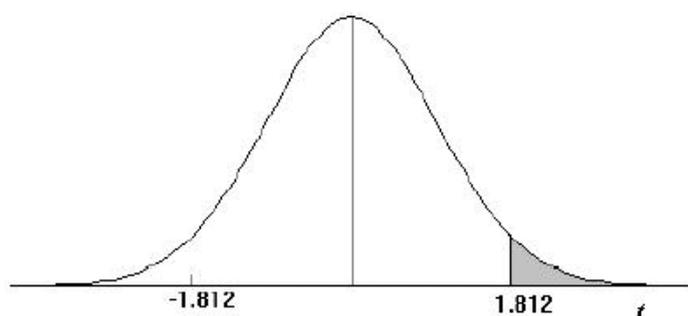
$$P[Z > 1] = 0.1587$$

$$P[Z > 1.96] = 0.0250$$

| Desv. normal x | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0 | 0.5000 | 0.4960 | 0.4920 | 0.4880 | 0.4840 | 0.4801 | 0.4761 | 0.4721 | 0.4681 | 0.4641 |
| 0.1 | 0.4602 | 0.4562 | 0.4522 | 0.4483 | 0.4443 | 0.4404 | 0.4364 | 0.4325 | 0.4286 | 0.4247 |
| 0.2 | 0.4207 | 0.4168 | 0.4129 | 0.4090 | 0.4052 | 0.4013 | 0.3974 | 0.3936 | 0.3897 | 0.3859 |
| 0.3 | 0.3821 | 0.3783 | 0.3745 | 0.3707 | 0.3669 | 0.3632 | 0.3594 | 0.3557 | 0.3520 | 0.3483 |
| 0.4 | 0.3446 | 0.3409 | 0.3372 | 0.3336 | 0.3300 | 0.3264 | 0.3228 | 0.3192 | 0.3156 | 0.3121 |
| 0.5 | 0.3085 | 0.3050 | 0.3015 | 0.2981 | 0.2946 | 0.2912 | 0.2877 | 0.2843 | 0.2810 | 0.2776 |
| 0.6 | 0.2743 | 0.2709 | 0.2676 | 0.2643 | 0.2611 | 0.2578 | 0.2546 | 0.2514 | 0.2483 | 0.2451 |
| 0.7 | 0.2420 | 0.2389 | 0.2358 | 0.2327 | 0.2296 | 0.2266 | 0.2236 | 0.2206 | 0.2177 | 0.2148 |
| 0.8 | 0.2119 | 0.2090 | 0.2061 | 0.2033 | 0.2005 | 0.1977 | 0.1949 | 0.1922 | 0.1894 | 0.1867 |
| 0.9 | 0.1841 | 0.1814 | 0.1788 | 0.1762 | 0.1736 | 0.1711 | 0.1685 | 0.1660 | 0.1635 | 0.1611 |
| 1.0 | 0.1587 | 0.1562 | 0.1539 | 0.1515 | 0.1492 | 0.1469 | 0.1446 | 0.1423 | 0.1401 | 0.1379 |
| 1.1 | 0.1357 | 0.1335 | 0.1314 | 0.1292 | 0.1271 | 0.1251 | 0.1230 | 0.1210 | 0.1190 | 0.1170 |
| 1.2 | 0.1151 | 0.1131 | 0.1112 | 0.1093 | 0.1075 | 0.1056 | 0.1038 | 0.1020 | 0.1003 | 0.0985 |
| 1.3 | 0.0968 | 0.0951 | 0.0934 | 0.0918 | 0.0901 | 0.0885 | 0.0869 | 0.0853 | 0.0838 | 0.0823 |
| 1.4 | 0.0808 | 0.0793 | 0.0778 | 0.0764 | 0.0749 | 0.0735 | 0.0721 | 0.0708 | 0.0694 | 0.0681 |
| 1.5 | 0.0668 | 0.0655 | 0.0643 | 0.0630 | 0.0618 | 0.0606 | 0.0594 | 0.0582 | 0.0571 | 0.0559 |
| 1.6 | 0.0548 | 0.0537 | 0.0526 | 0.0516 | 0.0505 | 0.0495 | 0.0485 | 0.0475 | 0.0465 | 0.0455 |
| 1.7 | 0.0446 | 0.0436 | 0.0427 | 0.0418 | 0.0409 | 0.0401 | 0.0392 | 0.0384 | 0.0375 | 0.0367 |
| 1.8 | 0.0359 | 0.0351 | 0.0344 | 0.0336 | 0.0329 | 0.0322 | 0.0314 | 0.0307 | 0.0301 | 0.0294 |
| 1.9 | 0.0287 | 0.0281 | 0.0274 | 0.0268 | 0.0262 | 0.0256 | 0.0250 | 0.0244 | 0.0239 | 0.0233 |
| 2.0 | 0.0228 | 0.0222 | 0.0217 | 0.0212 | 0.0207 | 0.0202 | 0.0197 | 0.0192 | 0.0188 | 0.0183 |
| 2.1 | 0.0179 | 0.0174 | 0.0170 | 0.0166 | 0.0162 | 0.0158 | 0.0154 | 0.0150 | 0.0146 | 0.0143 |
| 2.2 | 0.0139 | 0.0136 | 0.0132 | 0.0129 | 0.0125 | 0.0122 | 0.0119 | 0.0116 | 0.0113 | 0.0110 |
| 2.3 | 0.0107 | 0.0104 | 0.0102 | 0.0099 | 0.0096 | 0.0094 | 0.0091 | 0.0089 | 0.0087 | 0.0084 |
| 2.4 | 0.0082 | 0.0080 | 0.0078 | 0.0075 | 0.0073 | 0.0071 | 0.0069 | 0.0068 | 0.0066 | 0.0064 |
| 2.5 | 0.0062 | 0.0060 | 0.0059 | 0.0057 | 0.0055 | 0.0054 | 0.0052 | 0.0051 | 0.0049 | 0.0048 |
| 2.6 | 0.0047 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0043 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0036 |
| 2.7 | 0.0035 | 0.0034 | 0.0033 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0030 | 0.0029 | 0.0028 | 0.0027 | 0.0026 |
| 2.8 | 0.0026 | 0.0025 | 0.0024 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0022 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0020 | 0.0019 |
| 2.9 | 0.0019 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0014 | 0.0014 |
| 3.0 | 0.0013 | 0.0013 | 0.0013 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0010 | 0.0010 |

Anexo A. 16. Distribución t de Student.

Puntos de porcentaje de la distribución t



Ejemplo

Para $\phi = 10$ grados de libertad:

$$P[t > 1.812] = 0.05$$

$$P[t < -1.812] = 0.05$$

| α Γ | 0,25 | 0,2 | 0,15 | 0,1 | 0,05 | 0,025 | 0,01 | 0,005 | 0,0005 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
| 1 | 1,000 | 1,376 | 1,963 | 3,078 | 6,314 | 12,706 | 31,821 | 63,656 | 636,578 |
| 2 | 0,816 | 1,061 | 1,386 | 1,886 | 2,920 | 4,303 | 6,965 | 9,925 | 31,600 |
| 3 | 0,765 | 0,978 | 1,250 | 1,638 | 2,353 | 3,182 | 4,541 | 5,841 | 12,924 |
| 4 | 0,741 | 0,941 | 1,190 | 1,533 | 2,132 | 2,776 | 3,747 | 4,604 | 8,610 |
| 5 | 0,727 | 0,920 | 1,156 | 1,476 | 2,015 | 2,571 | 3,365 | 4,032 | 6,869 |
| 6 | 0,718 | 0,906 | 1,134 | 1,440 | 1,943 | 2,447 | 3,143 | 3,707 | 5,959 |
| 7 | 0,711 | 0,896 | 1,119 | 1,415 | 1,895 | 2,365 | 2,998 | 3,499 | 5,408 |
| 8 | 0,706 | 0,889 | 1,108 | 1,397 | 1,860 | 2,306 | 2,896 | 3,355 | 5,041 |
| 9 | 0,703 | 0,883 | 1,100 | 1,383 | 1,833 | 2,262 | 2,821 | 3,250 | 4,781 |
| 10 | 0,700 | 0,879 | 1,093 | 1,372 | 1,812 | 2,228 | 2,764 | 3,169 | 4,587 |
| 11 | 0,697 | 0,876 | 1,088 | 1,363 | 1,796 | 2,201 | 2,718 | 3,106 | 4,437 |
| 12 | 0,695 | 0,873 | 1,083 | 1,356 | 1,782 | 2,179 | 2,681 | 3,055 | 4,318 |
| 13 | 0,694 | 0,870 | 1,079 | 1,350 | 1,771 | 2,160 | 2,650 | 3,012 | 4,221 |
| 14 | 0,692 | 0,868 | 1,076 | 1,345 | 1,761 | 2,145 | 2,624 | 2,977 | 4,140 |
| 15 | 0,691 | 0,866 | 1,074 | 1,341 | 1,753 | 2,131 | 2,602 | 2,947 | 4,073 |
| 16 | 0,690 | 0,865 | 1,071 | 1,337 | 1,746 | 2,120 | 2,583 | 2,921 | 4,015 |
| 17 | 0,689 | 0,863 | 1,069 | 1,333 | 1,740 | 2,110 | 2,567 | 2,898 | 3,965 |
| 18 | 0,688 | 0,862 | 1,067 | 1,330 | 1,734 | 2,101 | 2,552 | 2,878 | 3,922 |
| 19 | 0,688 | 0,861 | 1,066 | 1,328 | 1,729 | 2,093 | 2,539 | 2,861 | 3,883 |
| 20 | 0,687 | 0,860 | 1,064 | 1,325 | 1,725 | 2,086 | 2,528 | 2,845 | 3,850 |
| 21 | 0,686 | 0,859 | 1,063 | 1,323 | 1,721 | 2,080 | 2,518 | 2,831 | 3,819 |
| 22 | 0,686 | 0,858 | 1,061 | 1,321 | 1,717 | 2,074 | 2,508 | 2,819 | 3,792 |
| 23 | 0,685 | 0,858 | 1,060 | 1,319 | 1,714 | 2,069 | 2,500 | 2,807 | 3,768 |
| 24 | 0,685 | 0,857 | 1,059 | 1,318 | 1,711 | 2,064 | 2,492 | 2,797 | 3,745 |
| 25 | 0,684 | 0,856 | 1,058 | 1,316 | 1,708 | 2,060 | 2,485 | 2,787 | 3,725 |
| 26 | 0,684 | 0,856 | 1,058 | 1,315 | 1,706 | 2,056 | 2,479 | 2,779 | 3,707 |
| 27 | 0,684 | 0,855 | 1,057 | 1,314 | 1,703 | 2,052 | 2,473 | 2,771 | 3,689 |
| 28 | 0,683 | 0,855 | 1,056 | 1,313 | 1,701 | 2,048 | 2,467 | 2,763 | 3,674 |
| 29 | 0,683 | 0,854 | 1,055 | 1,311 | 1,699 | 2,045 | 2,462 | 2,756 | 3,660 |
| 30 | 0,683 | 0,854 | 1,055 | 1,310 | 1,697 | 2,042 | 2,457 | 2,750 | 3,646 |
| 40 | 0,681 | 0,851 | 1,050 | 1,303 | 1,684 | 2,021 | 2,423 | 2,704 | 3,551 |
| 60 | 0,679 | 0,848 | 1,045 | 1,296 | 1,671 | 2,000 | 2,390 | 2,660 | 3,460 |
| 120 | 0,677 | 0,845 | 1,041 | 1,289 | 1,658 | 1,980 | 2,358 | 2,617 | 3,373 |
| ∞ | 0,674 | 0,842 | 1,036 | 1,282 | 1,645 | 1,960 | 2,326 | 2,576 | 3,290 |

Anexo A. 17. Factores para Diagramas de Control.

| Número de elementos de la muestra n | Cuadro para promedios | Cuadro para amplitudes de variación | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------|
| | Factores para límites de control | Factores para línea central | Factores para límites de control | |
| | A2 | d2 | D2 | D4 |
| 2 | 1,050 | 1,428 | 0,000 | 2,257 |
| 3 | 1,023 | 1,693 | 0,000 | 2,578 |
| 4 | 0,729 | 2,059 | 0,000 | 2,282 |
| 5 | 0,577 | 2,328 | 0,000 | 2,115 |
| 6 | 0,483 | 2,534 | 0,000 | 2,034 |
| 7 | 0,419 | 2,704 | 0,105 | 1,924 |
| 8 | 0,373 | 2,047 | 0,135 | 1,804 |
| 9 | 0,337 | 2,970 | 0,104 | 1,815 |
| 10 | 0,200 | 3,078 | 0,223 | 1,777 |
| 11 | 0,205 | 3,173 | 0,255 | 1,744 |
| 12 | 0,266 | 3,255 | 0,204 | 1,716 |
| 13 | 0,249 | 3,335 | 0,308 | 1,092 |
| 14 | 0,235 | 3,407 | 0,329 | 1,571 |
| 15 | 0,222 | 3,472 | 0,348 | 1,852 |

Anexo A. 18. F1 – Formato de registro del contenido de humedad

| F1- A – Formato de registro de muestra piloto | | | |
|---|----------|------------|-------|
| Responsable | | | |
| Fecha: | | # Prueba | |
| Variable: Contenido de humedad inicial del maíz (%) | | | |
| N | $\phi 1$ | $(X-X)^2$ | |
| 1 | 0,2000 | 0,00% | |
| 2 | 0,2000 | 0,00% | |
| 3 | 0,2000 | 0,00% | |
| 4 | 0,2200 | 0,03% | |
| 5 | 0,1900 | 0,01% | |
| 6 | 0,1900 | 0,01% | |
| 7 | 0,2000 | 0,00% | |
| 8 | 0,2100 | 0,01% | |
| 9 | 0,2100 | 0,01% | |
| 10 | 0,2000 | 0,00% | |
| Promedio | 0,2020 | $\Sigma =$ | 0,08% |
| Desviación estándar | | 0,92% | |
| Observaciones | | | |
| | | | |
| | | | |

| F1 - B - Formato de registro de muestra | | | |
|---|----------|------------|-------|
| Responsable | | | |
| Fecha: | | # Prueba | |
| Variable: Contenido de humedad inicial del maíz (%) | | | |
| N | $\phi 1$ | $(X-X)^2$ | |
| 1 | 24,00% | 0,04% | |
| 2 | 23,80% | 0,03% | |
| 3 | 22,90% | 0,01% | |
| 4 | 23,50% | 0,02% | |
| 5 | 23,70% | 0,03% | |
| 6 | 20,10% | 0,04% | |
| 7 | 21,80% | 0,00% | |
| 8 | 21,50% | 0,00% | |
| 9 | 21,00% | 0,01% | |
| 10 | 20,90% | 0,01% | |
| 11 | 20,00% | 0,04% | |
| 12 | 22,00% | 0,00% | |
| Promedio | 22,10% | $\Sigma =$ | 0,23% |
| Desviación estándar | | 1,45% | |
| Observaciones | | | |
| | | | |
| | | | |

| F1 - C - Formato de registro de muestra | | | |
|---|----------|------------|-------|
| Responsable | | | |
| Fecha: | | # Prueba | |
| Variable: Contenido de humedad final del maíz (%) | | | |
| N | $\phi 1$ | $(X-X)^2$ | |
| 1 | 15,30% | 0,01% | |
| 2 | 13,80% | 0,00% | |
| 3 | 13,90% | 0,00% | |
| 4 | 14,90% | 0,00% | |
| 5 | 14,50% | 0,00% | |
| 6 | 14,50% | 0,00% | |
| 7 | 14,80% | 0,00% | |
| 8 | 14,20% | 0,00% | |
| 9 | 14,10% | 0,00% | |
| 10 | 15,00% | 0,00% | |
| 11 | 15,00% | 0,00% | |
| 12 | 14,00% | 0,00% | |
| Promedio | 14,50% | $\Sigma =$ | 0,03% |
| Desviación estándar | | 0,50% | |
| Observaciones | | | |
| | | | |
| | | | |

Anexo A. 19. F2 - Hoja de registro de datos del proceso de secado

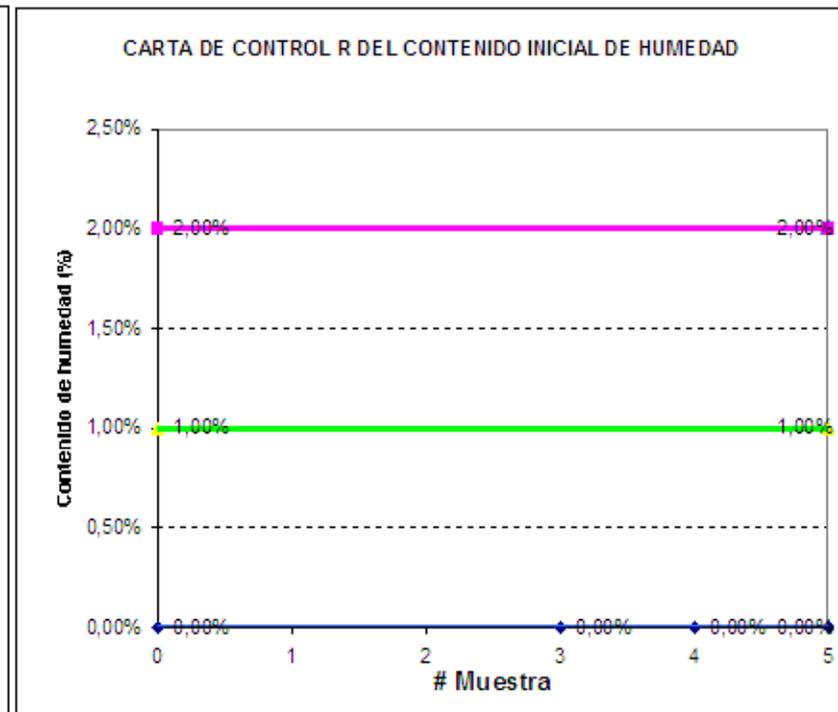
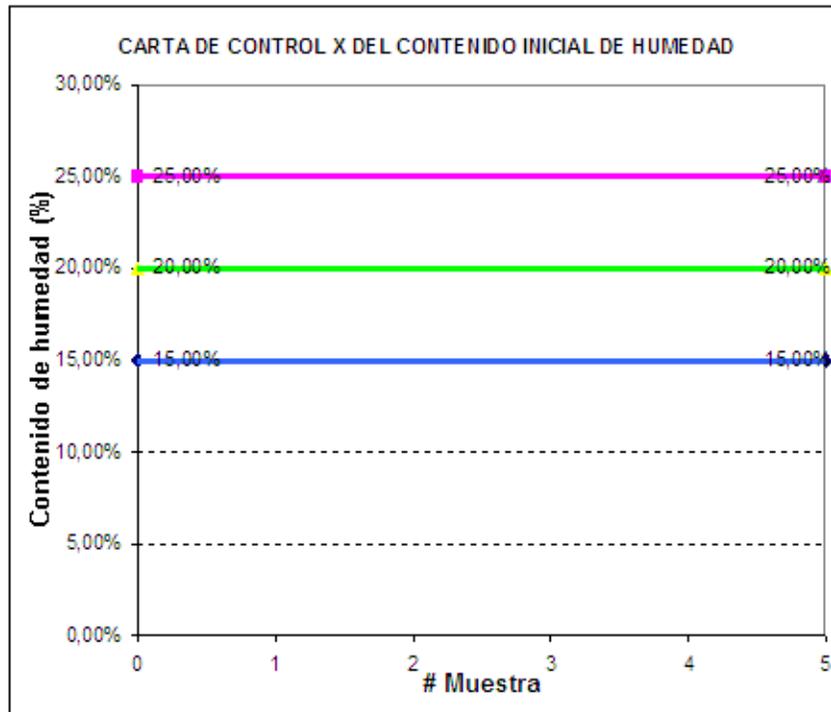
| F2 - Hoja de registro de datos del proceso de secado | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Responsable | | | | | Fecha: | | |
| | Característica | Símbolo | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Promedio | Unidades |
| Producto | Masa maíz | m | | | | | [gr] |
| Condiciones ambiente | Temperatura bulbo seco | Tas1 | | | | | [C] |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah1 | | | | | |
| Aire de secado | Temperatura bulbo seco | Tas2 | | | | | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah2 | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | | | | | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | | | | | |
| Proceso | Velocidad de operación motor | wm | | | | | [r.p.m] |
| | Velocidad de operación ventilador | wvent | | | | | |
| | Caudal de aire | ma | | | | | |
| | Tiempo de secado | t | | | | | [h] |
| | Volumen inicial de diesel | | | | | | |
| | Volumen final de diesel | | | | | | |
| | Consumo de gas | cc | | | | | |
| Observaciones | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Anexo A. 20. F3 - Hoja de evaluación del software de cálculo

| F3 - Hoja de evaluación del software de cálculo | | | | | | |
|--|--|------------|------------|------------|----------|-------|
| Responsable | | | | | Fecha: | |
| Característica | Símbolo | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Unidades | |
| Valores medidos de las características del proceso | | | | | | |
| Producto | Masa maíz | m | | | | [qq] |
| | Contenido de humedad inicial del grano | $\phi 1$ | | | | [%] |
| Condiciones ambiente | Temperatura bulbo seco | Tas1 | | | | [C] |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah1 | | | | |
| Aire de secado | Temperatura bulbo seco | Tas2 | | | | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah2 | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | | | | |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | | | | |
| Proceso | Tiempo secado | t | | | | [s] |
| | Masa real de maíz | m | | | | [Kg] |
| | Flujo aire (velocidad) | | | | | [m/s] |
| | Contenido de humedad final del grano | $\phi 2$ | | | | [%] |
| Valores calculados | | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | | | | [C] |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | | | | |
| Proceso | Tiempo secado | t | | | | [s] |
| | Contenido de humedad final del grano | $\phi 2$ | | | | [%] |
| Errores obtenidos | | | | | | |
| Salida secador | Temperatura bulbo seco | Tas3 | | | | [C] |
| | Temperatura bulbo húmedo | Tah3 | | | | |
| Proceso | Tiempo secado | t | | | | [s] |
| | Contenido de humedad final del grano | $\phi 2$ | | | | [%] |
| Observaciones | | | | | | |

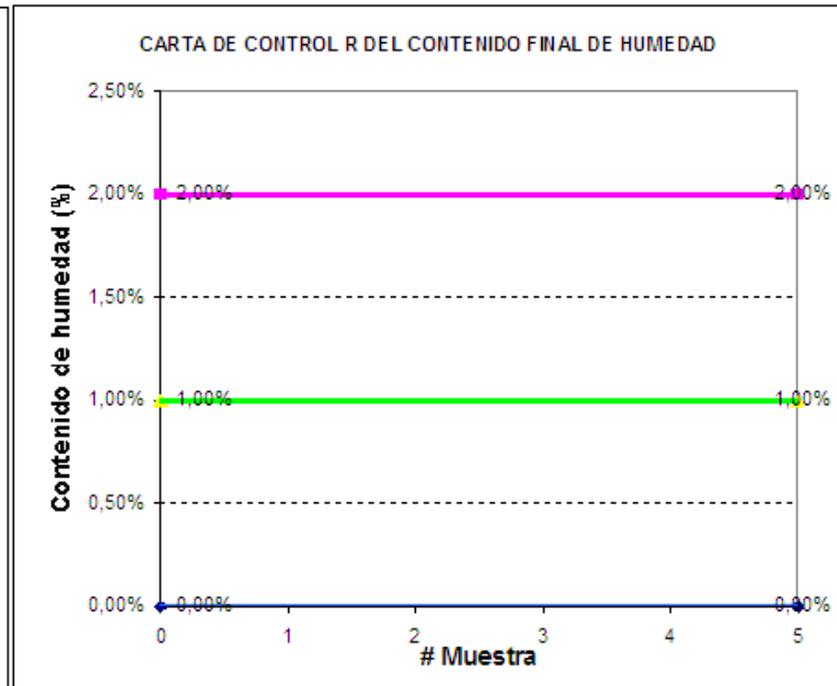
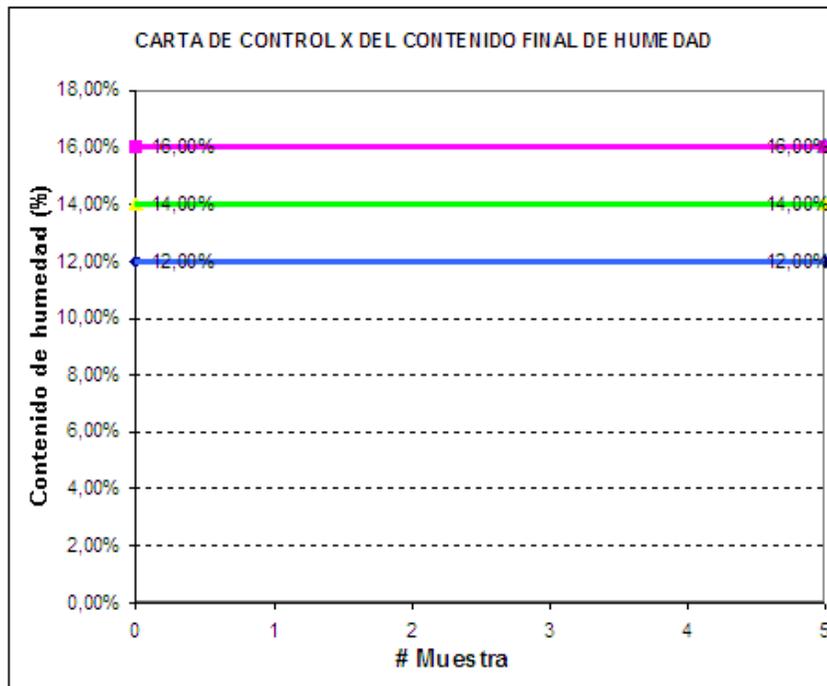
Anexo A. 21.F4 - Hoja de registro de contenidos de humedad inicial $\phi 1$

| F4 - Hoja de registro de contenidos de humedad inicial $\phi 1$ | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------|----------|
| Responsable | | | Fecha: | | | | |
| Tamaño de la muestra | MEDIAS | A2 | | LIC | 15,00% | LSC | 25,00% |
| 4 | RANGOS | d2 | | D3 | | D4 | |
| | | LC | 1,00% | LIC | 0,00% | LSC | 2,00% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio (X) | Rango (R) | Unidades |
| 1 | | | | | | | [%] |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | 20,00% | | |



Anexo A. 22.F5 - Hoja de registro de contenidos de humedad final ϕ 2

| F5 - Hoja de registro de contenidos de humedad final ϕ 2 | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|----------|----------|-------|
| Responsable | | | Fecha: | | | | |
| Tamaño de la muestra | MEDIAS | A2 | LIC | 12,00% | LSC | 16,00% | |
| 4 | RANGOS | d2 | D3 | D4 | | | |
| | | LC | 1,00% | LIC | 0,00% | LSC | 2,00% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio | Unidades | |
| 1 | | | | | | [%] | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| | | | | | 14,00% | | |



Anexo A. 23. Documentación costos secadora.



Sr.
Juan Carlos Jiménez
Telf. 097-102937
Quito.-/

CONTRIBUYENTE ESPECIAL
RESOLUC. # 616 DEL 08/08/01
S.R.I.

COTIZACION N° 060

Quevedo, Abril 10 del 2003

Estimado señor,

Es muy grato para INDUHORST poner en su consideración la cotización de una secadora para maíz con capacidad para 600 qq por carga, compuesta por:

Un Ventilador marca **JATUN HUAYRA** modelo **BP-AL 11** con motor de 15HP. Equipado con campana difusora y polea de arranque. Un Quemador de **GAS** marca **MEPHISTO** modelo **QG-2** con múltiple de 36 válvulas italianas para instalación de 36 cilindros de gas. Construidos en acero al carbono, pintados con fondo anticorrosivo y con pintura color gris martillado (Ventilador) y azul martillado (Quemador).

PRECIO:

| | |
|------------------------|----------------------|
| Ventilador BP-AL 11 | 1,452.00 US\$ |
| Motor de 15HP | 690.00 |
| Campana difusora | 183.00 |
| Polea de arranque 15HP | 282.00 |
| Quemador QG-2 | 1,042.00 |
| Múltiple de 36 Válv. | 907.00 |
| <hr/> | |
| Sub-Total: | 4,556.00 US\$ |
| 12% Iva | 546.72 |
| <hr/> | |
| TOTAL COTIZADO: | 5,102.72 US\$ |

VENTILADOR

Caudal 8 m³/s
Rotor 1670 RPM
Presión 1100 N/m
Potencia 11 KW

QUEMADOR

Valor Térmico 400.000 1.200.000BTU
Capacidad 8.....24 Kg. GAS/h.
Válvula selenoide de seguridad
Encendido eléctrico integrado
Caja de control de llamas
Múltiple para instalación de 36 cilindros

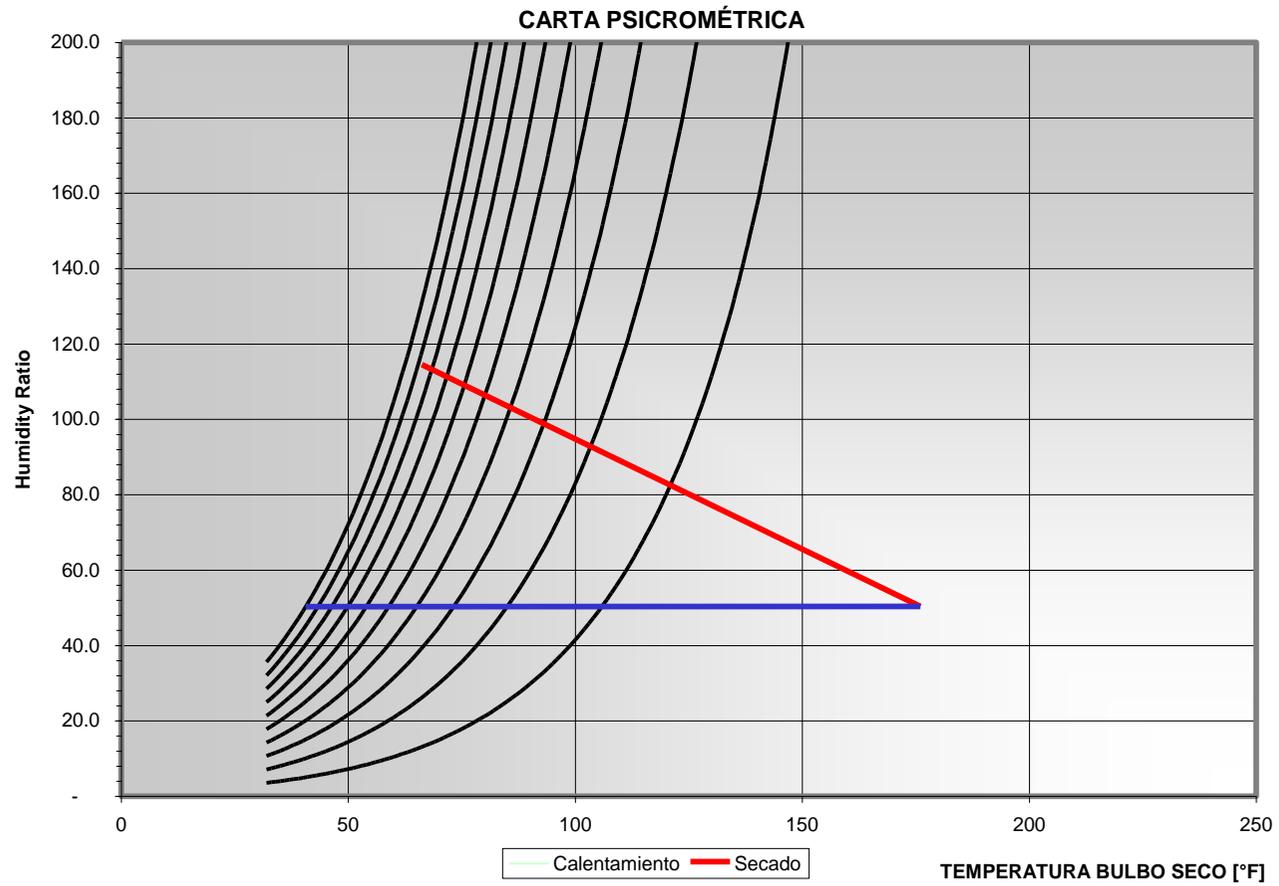
CONDICIONES:

Forma de Pago: Negociable
Tiempo de Entrega: 30 días
Garantía: 12 meses ventilador, 6 meses quemador
Precios no incluyen: Costo de obra civil, instalación eléctrica, estructura metálica, planchas perforadas, transporte, ni montaje de los equipos.



Barney Jacome
Sr. Barney Jacome S.
GERENTE GENERAL

Anexo B. Psicrometría del proceso de secado



Anexo C. Planos

Anexo B. 1. Diagrama Gantt

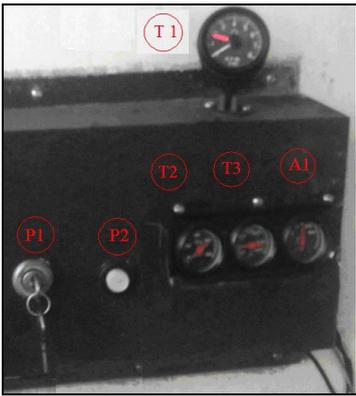
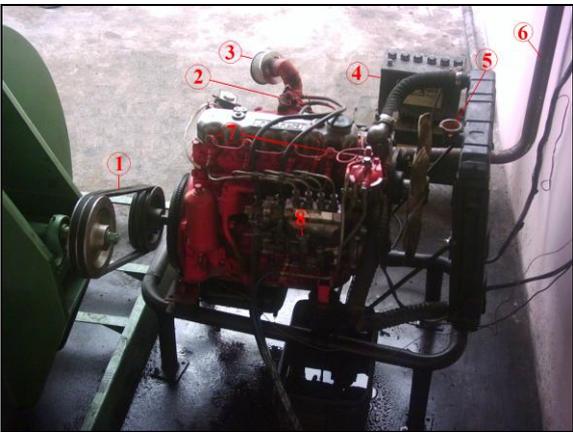
| ACTIVIDADES | SEMANAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Establecer objetivos, justificación, alcance. | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Generalidades. | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Parámetros del secado de granos | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Clasificación de los secadores respecto al flujo del producto | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Transferencia de calor en lecho fluido | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Descripción de los subsistemas | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| Determinación variables intervienen lecho estacionario | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | |
| Selección de la alternativa óptima | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | |
| Programa de pruebas | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | |
| Adecuación de los subsistemas existentes | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | |
| Construcción e instalación de equipos | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | |
| Instrumentación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | | |
| Pruebas de evaluación funcionamiento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | |
| Memoria técnica | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Anexo D. Manual de operación

A. INTRODUCCIÓN:

Antes de iniciar la operación del secador lea y siga cuidadosamente todas las PRECAUCIONES de este manual. Para su normal operación siga todas las instrucciones detenidamente. Las operaciones de mantenimiento periódico (preventivo) y correctivo deben ser realizadas por personal calificado.

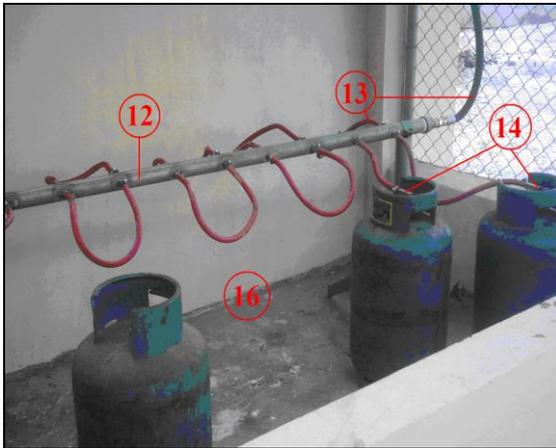
B. COMPONENTES:

| COMPONENTES | |
|---|---|
| Panel de instrumentos y control | |
|  | <p>Interruptor de encendido del motor (P1) Botón pulsador de bujías de precalentamiento de combustible (P2) Tacómetro. (T 1) Termómetro temperatura aceite. (T 3) Termómetro temperatura agua. (T 2) Amperímetro. (A1)</p> |
| Motor | |
|  | <p>Bandas de transmisión (1) Acelerador (2) Filtro depurador de aire (3) Batería (4) Radiador (5) Tubo de escape (6) Bujías de precalentamiento (7) Bomba de inyección (purgador) (8) Alternador (9) Depósito de combustible (10) Base del motor (11)</p> |
| <p>Fotografía C. 1. Panel de instrumentos.</p> | |
| <p>Fotografía C. 2. Motor ISUZU C190.</p> | |



Fotografía C. 3. Motor Isuzu C190.

Batería de tanques de gas GLP



Fotografía C. 4. Múltiple de alimentación de GLP.

- Múltiple de alimentación (12)
- Mangueras de conexión (13)
- Válvula de paso (14)
- Manómetro (15)
- Depósito de agua (16)

Quemador:



Fotografía C. 5. Quemador Mephisto QG3.

- Interruptor principal (17)
- Pulsador de chispa (18)
- Válvula reguladora de caudal (19)

Referencia: Autores.

C. PRECAUCIONES:

Evitar en cualquier momento la presencia de menores de edad dentro del cuarto de equipos de la secadora y del cuarto de baterías de gas.

D. OPERACIÓN:

Antes de encender:

1. Verificar el nivel del depósito de combustible del motor (10).
2. En caso de que el depósito se encuentre vacío purgar la línea de alimentación de combustible del motor.



3. Verificar el nivel de agua de la batería (4).
4. Verificar el nivel de agua del radiador del motor (5).
5. Verificar la tensión de las bandas que conectan el motor y el ventilador (1).



6. Verificar el nivel de aceite del motor.

7. Revisar que las válvulas de paso (14) de cada tanque de gas en el múltiple de alimentación se encuentren cerradas.



8. Llenar de agua el depósito (16) donde se encuentran el múltiple de alimentación y los tanques de gas.
9. Verificar que la válvula reguladora de gas del quemador (19) se encuentre en posición completamente cerrada.



10. Revisar que el quemador QG3 se encuentre conectado a la red de alimentación eléctrica 110 [V].
11. Verificar que la lectura del manómetro de la línea de alimentación de gas (15) se mantenga en 0 (cero) PSI.



12. Verificar la posición del quemador apuntando directamente a la entrada de aire del ventilador centrífugo.



Encendido del motor:

13. Registrar la masa de maíz a secarse durante la operación y las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire del ambiente.
14. Insertar la llave en el interruptor P1 y llevar a la posición de contacto.
15. Oprimir y mantener el botón pulsador P2 oprimido durante 30 [s] para calentar las bujías de precalentamiento.



16. Girar la llave de P1 hacia la posición encendido durante 5 [s].
17. Si el motor no enciende repetir los pasos 14 y 15 tres veces.
18. Si después de tres intentos de encendido el motor no arranca, retirar la tapa del filtro depurador de aire (3) e inyectar éter.



A continuación repita el paso 14, 15 y 16 hasta encender el motor.

19. Verificar que la lectura del tacómetro del motor (T1) se encuentre entre () rpm.
20. Tomar lectura y registrar los datos de los medidores de temperatura de agua (T2), de aceite (T3) y nivel de carga de la batería (A1).



Encendido del quemador:

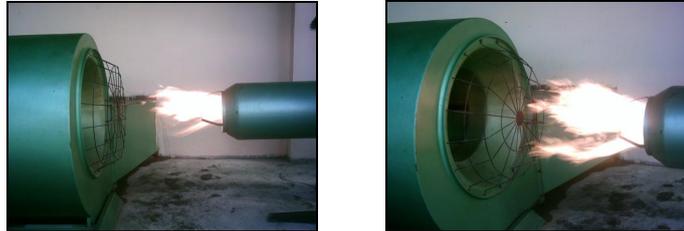
21. Mantener cerradas las válvulas (14) de cada tanque de GLP en el múltiple de alimentación (12).
22. Abrir las válvulas de 3 tanques de gas y verificar que la lectura del manómetro (15) de la línea de alimentación suba paulatinamente hasta estabilizarse.
23. Esperar 5 (cinco) minutos y verificar que la lectura del manómetro no haya bajado. En caso de que la lectura haya disminuido NO ENCENDER el equipo y verificar la existencia de fugas en la línea de alimentación de combustible.



24. Activar el interruptor principal del quemador (17).
25. Oprimir y mantener oprimido el botón de encendido del quemador (18).



26. Abrir lentamente la válvula reguladora de gas del quemador (19) hasta obtener una llama de color azul.



27. Una vez que la llama se ha estabilizado soltar el botón de encendido del quemador (17).
28. Tomar lectura y registrar las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire caliente que ingresa a la cámara de secado.
29. En caso de que la temperatura del aire supere los 80° C, cierre la válvula reguladora de gas del quemador y aleje el quemador de la entrada de aire del quemador.
30. Repita los pasos 24 al 26 hasta obtener la temperatura deseada.
31. Verificar que la presión de la línea de alimentación del sistema de calentamiento, en el manómetro no haya disminuido por debajo de 20 psi al menos una vez cada hora de operación.
32. En caso de que la presión disminuya a 20 Psi o menos, abrir otros 3 tanques de gas.

Apagado del quemador:

33. Cerrar las válvulas de los tanques de gas conectados al múltiple de admisión (12) hasta purgar completamente la línea de combustible.



34. Esperar 5 minutos hasta que la lectura del manómetro llegue a 0 (cero) y cerrar la válvula reguladora de gas (18) del quemador.

35. Desactivar el interruptor principal del quemador (17)

Apagado del motor:

36. Girar la llave del (P1) hasta la posición OFF.

Recomendaciones durante la operación:

37. Cada dos horas de operación realice los pasos del 32 al 34, revolver el maíz en la cámara de secado y repetir los pasos del 20 al 26.

E. PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO:

| | Actividades | Frecuencia | | | |
|----------------------|--|----------------|-------|---|--------|
| | | Cada operación | 3 | 6 | Otros |
| | | | Meses | | |
| Motor | Revisión niveles de fluidos: agua, aceite, líquido de batería. | X | | | |
| | Cambio de aceite | | X | X | |
| | Reemplazo bujías | | | | 2 años |
| | Reemplazo de bandas de transmisión | | | X | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Quemador | Calibración y/o reemplazo distancia entre electrodos de encendido. | | | | 2 años |
| | Verificar integridad componentes circuito eléctrico. | | | | 1 año |
| | Revisión de fugas. | | | X | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Ventilador | Engrasar chumaceras | | | | 1 año |
| | Reajuste general de pernos | | | | 2 años |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Referencia: Autores. | | | | | |

Anexo E. Reportes de pruebas

ANEXO E.1. Reporte del contenido de humedad inicial - Prueba 1

ANEXO E.2. Reporte del contenido de humedad final - Prueba 1

ANEXO E.3. Reporte del contenido de humedad inicial - Prueba 2

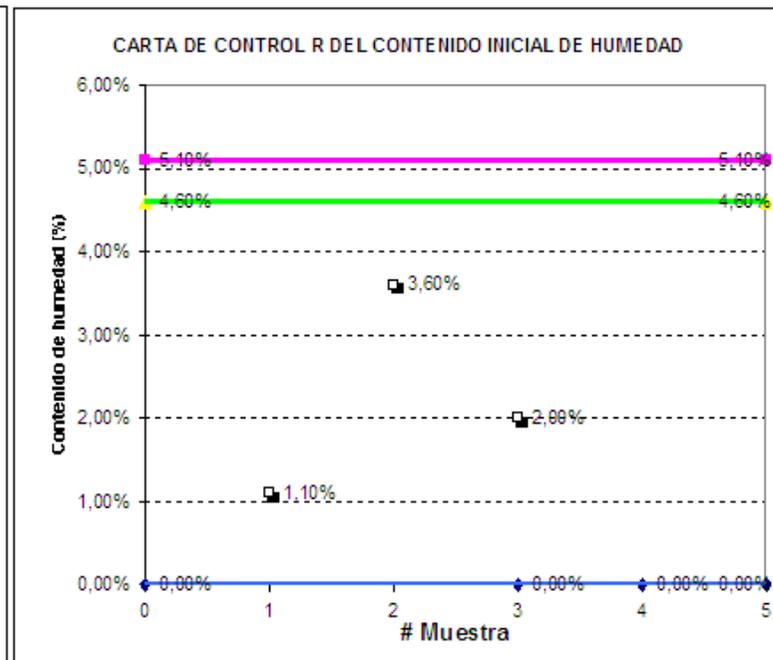
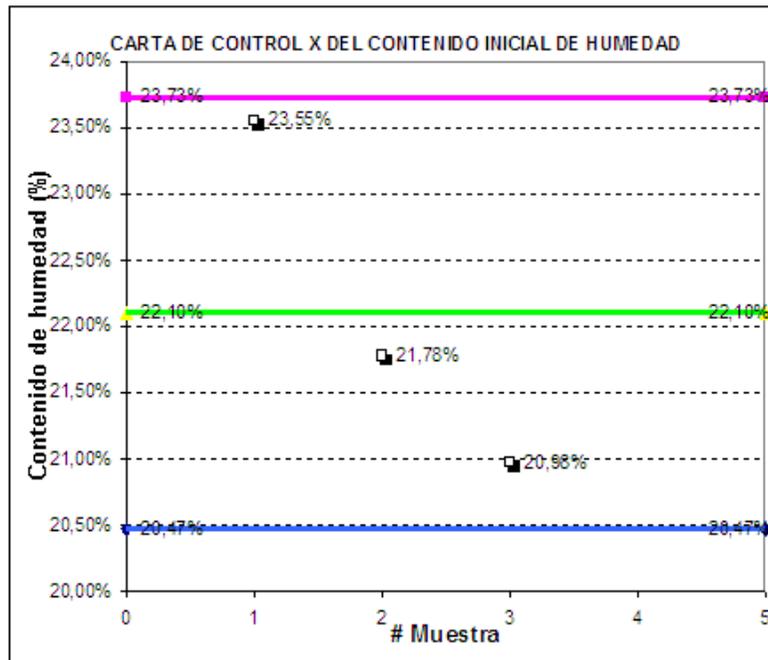
ANEXO E.4. Reporte del contenido de humedad final - Prueba 2

ANEXO E.5. Reporte del contenido de humedad inicial - Prueba 3

ANEXO E.6. Reporte del contenido de humedad final - Prueba 3

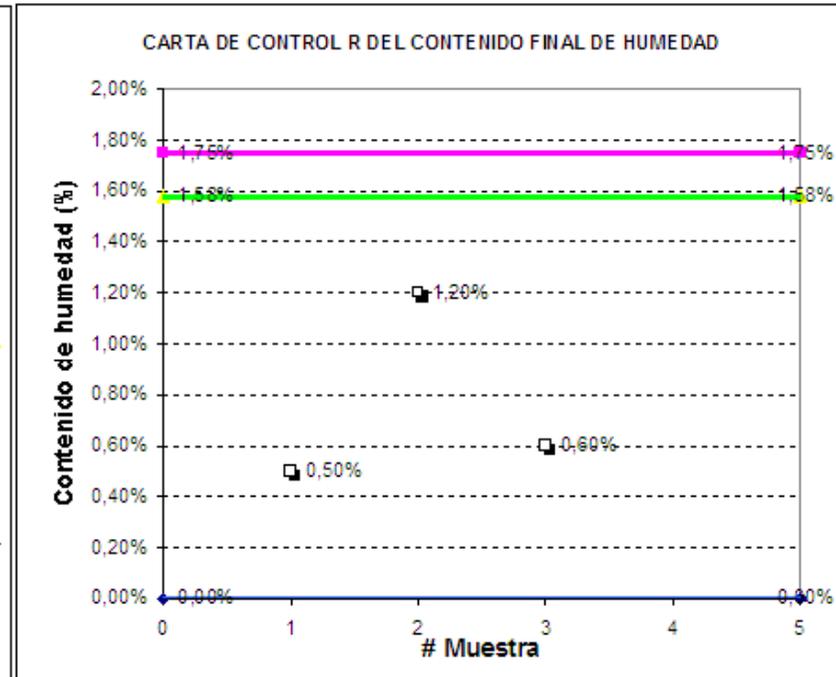
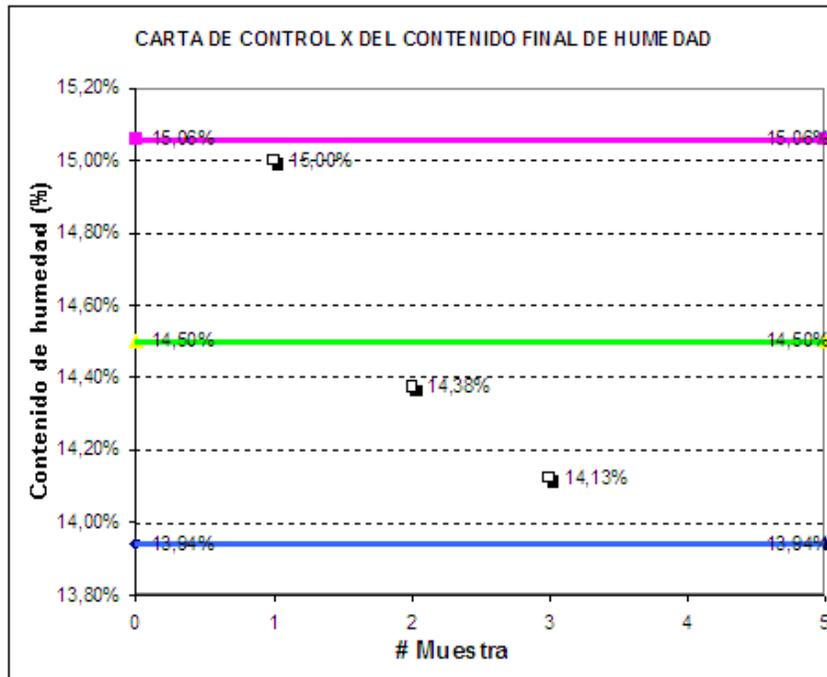
ANEXO E. 1. Reporte del contenido de humedad inicial - Prueba 1

| F4 - Hoja de registro de contenidos de humedad inicial | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|---------------|--------------|----------|
| Responsable | | | Fecha: | | | | |
| Tamaño de la muestra | MEDIAS | A2 | 0,729 | LIC | 20,47% | LSC | 23,73% |
| 4 | RANGOS | d2 | 2,059 | D3 | - | D4 | 2,282 |
| | | LC | 4,60% | LIC | 0,00% | LSC | 5,10% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio (X) | Rango (R) | Unidades |
| 1 | 24,00% | 23,80% | 22,90% | 23,50% | 23,55% | 1,10% | [%] |
| 2 | 23,70% | 20,10% | 21,80% | 21,50% | 21,78% | 3,60% | |
| 3 | 21,00% | 20,90% | 20,00% | 22,00% | 20,98% | 2,00% | |
| | | | | | 22,10% | 2,23% | |



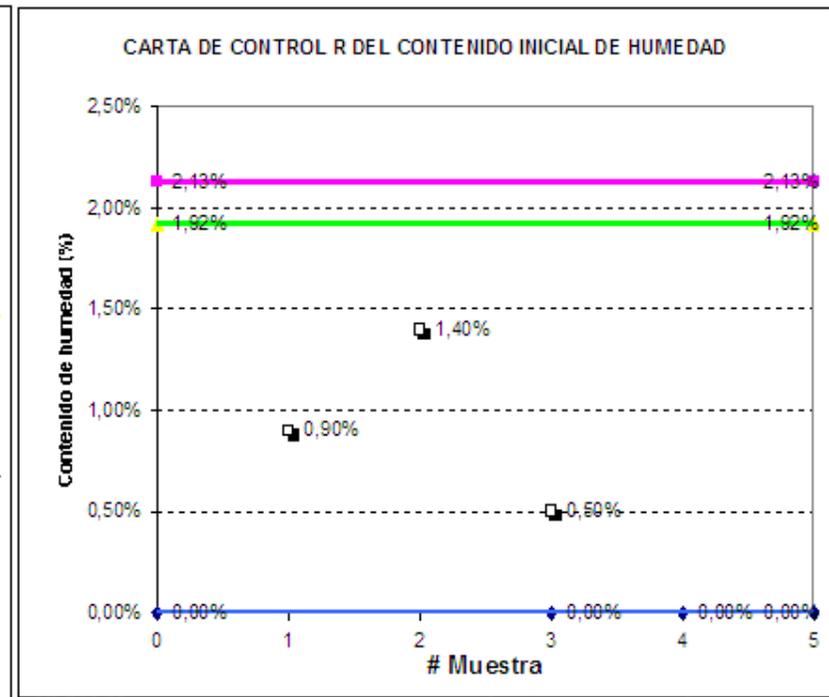
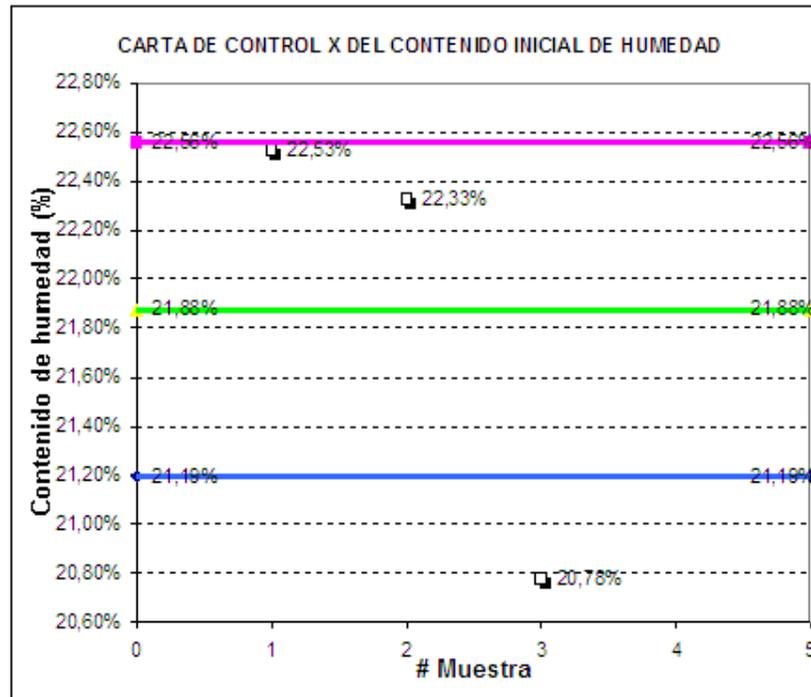
ANEXO E. 2. Reporte del contenido de humedad final - Prueba 1

| F5 - Hoja de registro de contenidos de humedad final ϕ 2 | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|----------|-------|----------|
| Responsable | | | Fecha: | | | | |
| Tamaño de la muestra | MEDIAS | A2 | 0,729 | LIC | 13,94% | LSC | 15,06% |
| 4 | RANGOS | d2 | 2,059 | D3 | - | D4 | 2,282 |
| | | LC | 1,58% | LIC | 0,00% | LSC | 1,75% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio | | Unidades |
| 1 | 15,30% | 14,80% | 14,90% | 15,00% | 15,00% | 0,50% | [%] |
| 2 | 13,80% | 14,20% | 14,50% | 15,00% | 14,38% | 1,20% | |
| 3 | 13,90% | 14,10% | 14,50% | 14,00% | 14,13% | 0,60% | |
| | | | | | 14,50% | 0,77% | |



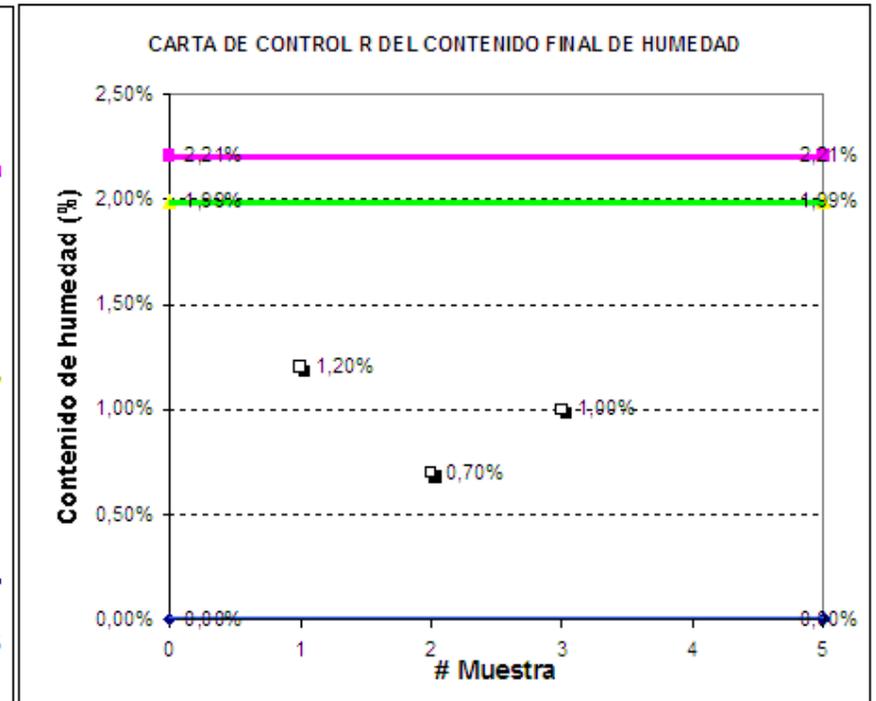
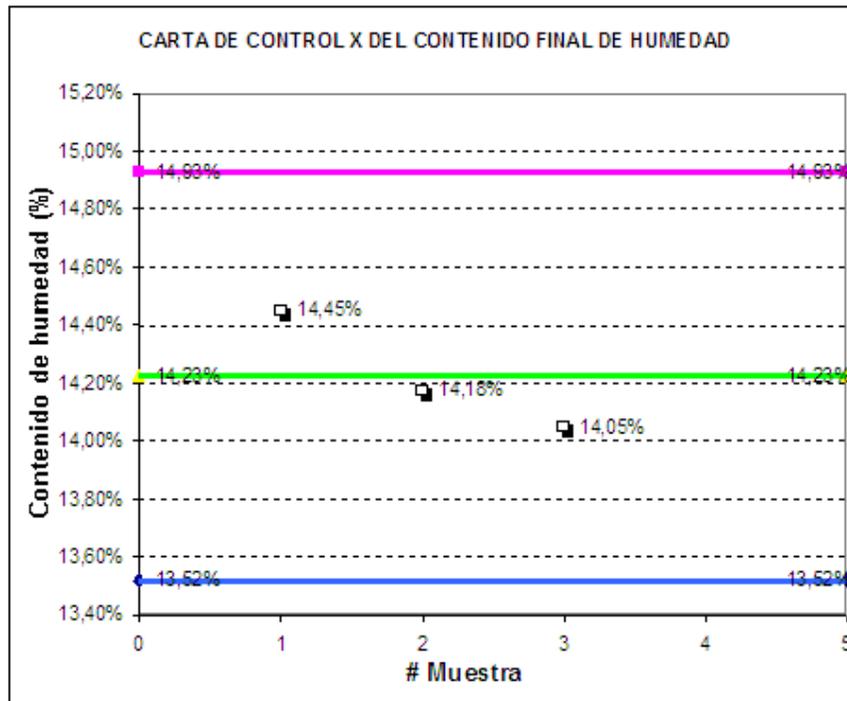
ANEXO E. 3. Reporte del contenido de humedad inicial - Prueba 2

| F4 - Hoja de registro de contenidos de humedad inicial #1 | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------|----------|
| Responsable | | | Fecha: | | | # Prueba | 2 |
| Tamaño de la muestra | MEDIAS | A2 | 0,729 | LIC | 21,19% | LSC | 22,56% |
| 4 | RANGOS | d2 | 2,059 | D3 | - | D4 | 2,282 |
| | | LC | 1,92% | LIC | 0,00% | LSC | 2,13% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio (X) | Rango (R) | Unidades |
| 1 | 22,50% | 23,00% | 22,10% | 22,50% | 22,53% | 0,90% | [%] |
| 2 | 23,10% | 22,50% | 22,00% | 21,70% | 22,33% | 1,40% | |
| 3 | 20,90% | 20,70% | 20,50% | 21,00% | 20,78% | 0,50% | |
| | | | | | 21,88% | 0,93% | |



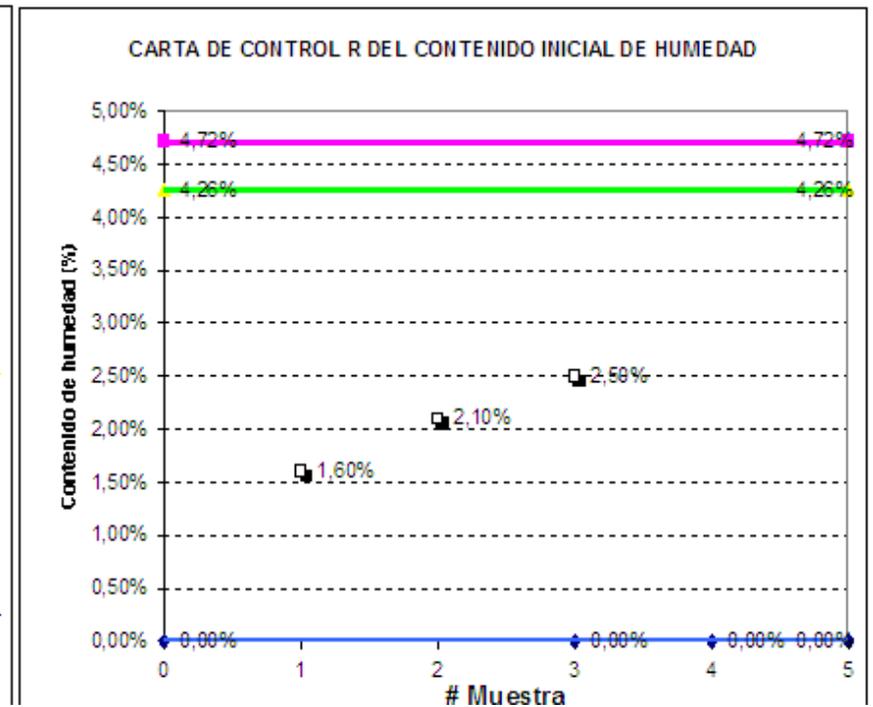
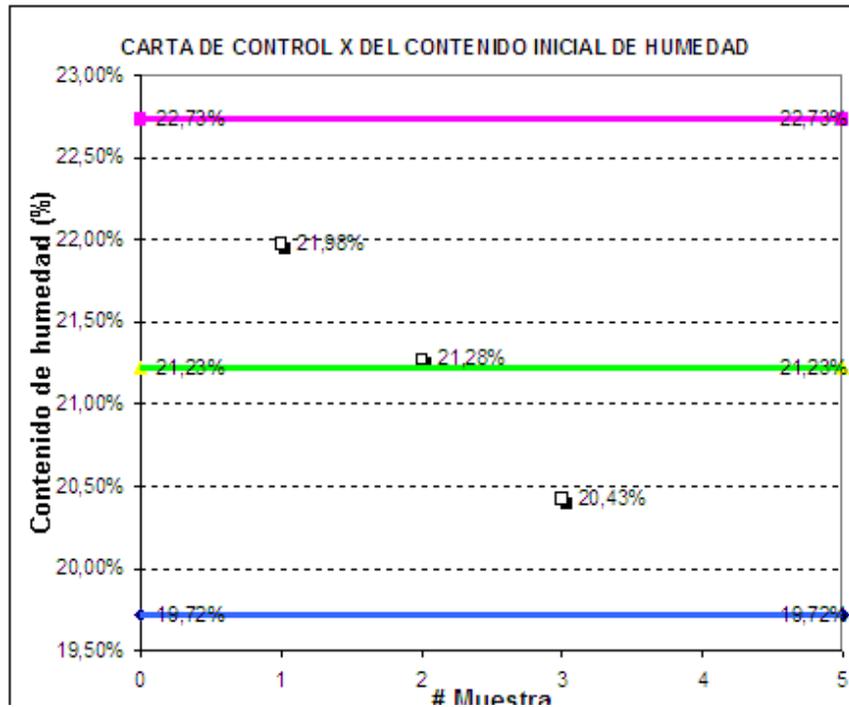
ANEXO E. 4. Reporte del contenido de humedad final - Prueba 2

| F5 - Hoja de registro de contenidos de humedad final ϕ 2 | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
| Responsable | | | Fecha: | | | # Prueba | 2 |
| Tamaño de la muestra | MEDIAS | A2 | 0,729 | LIC | 13,52% | LSC | 14,93% |
| 4 | RANGOS | d2 | 2,059 | D3 | - | D4 | 2,282 |
| | | LC | 1,99% | LIC | 0,00% | LSC | 2,21% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio | | Unidades |
| 1 | 14,80% | 15,00% | 14,20% | 13,80% | 14,45% | 1,20% | |
| 2 | 14,50% | 13,80% | 14,10% | 14,30% | 14,18% | 0,70% | [%] |
| 3 | 14,60% | 13,60% | 13,90% | 14,10% | 14,05% | 1,00% | |
| | | | | | 14,23% | 0,97% | |



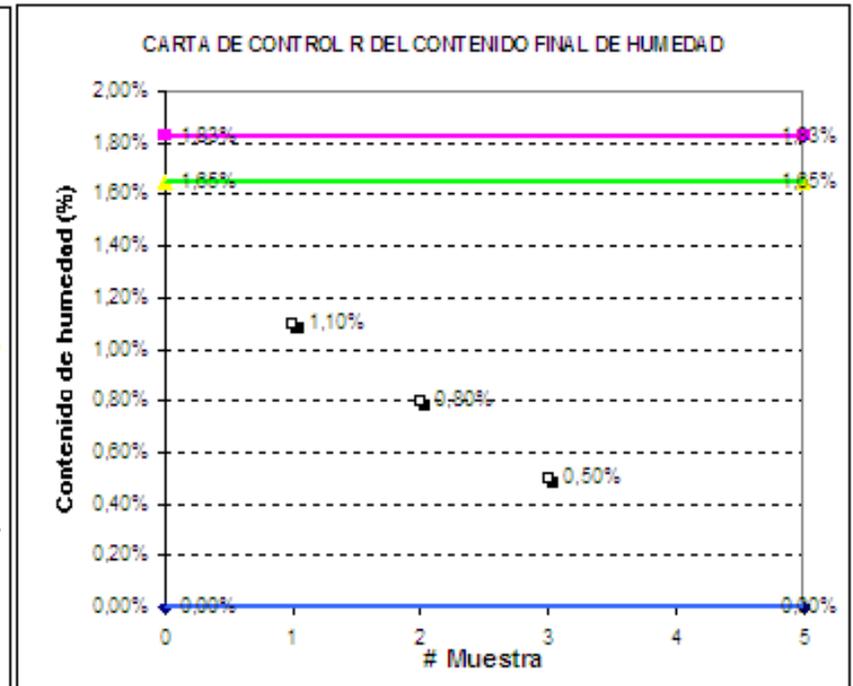
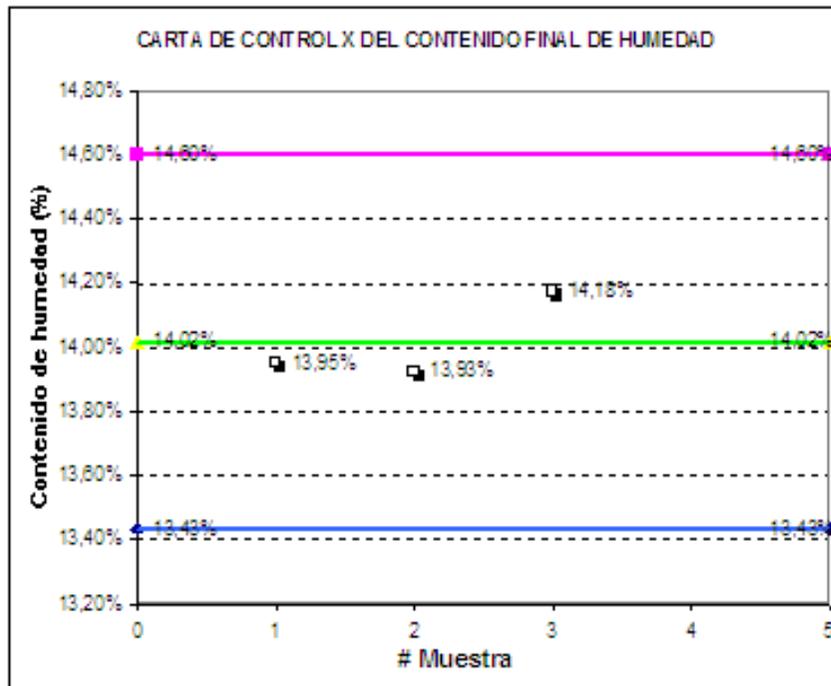
ANEXO E. 5. Reporte del contenido de humedad inicial - Prueba 3

| F4 - Hoja de registro de contenidos de humedad inicial | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|---------------|--------------|----------|
| Responsable | | Fecha: | | | | # Prueba | 3 |
| Tamaño de la muestra | MEDIAS | A2 | 0,729 | LIC | 19,72% | LSC | 22,73% |
| 4 | RANGOS | d2 | 2,059 | D3 | - | D4 | 2,282 |
| | | LC | 4,26% | LIC | 0,00% | LSC | 4,72% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio (X) | Rango (R) | Unidades |
| 1 | 23,00% | 22,00% | 21,50% | 21,40% | 21,98% | 1,60% | [%] |
| 2 | 20,80% | 22,00% | 22,20% | 20,10% | 21,28% | 2,10% | |
| 3 | 21,50% | 21,30% | 19,00% | 19,90% | 20,43% | 2,50% | |
| | | | | | 21,23% | 2,07% | |



ANEXO E. 6. Reporte del contenido de humedad final - Prueba 2

| F5 - Hoja de registro de contenidos de humedad final 02 | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
| Responsable | | | Fecha: | | | # Prueba | 3 |
| Tamaño de la muestra | MEDIAS | A2 | 0,729 | LIC | 13,43% | LSC | 14,60% |
| 4 | RANGOS | d2 | 2,059 | D3 | - | D4 | 2,282 |
| | | LC | 1,65% | LIC | 0,00% | LSC | 1,83% |
| Muestra # | Medicion 1 | Medicion 2 | Medicion 3 | Medicion 4 | Promedio | | Unidades |
| 1 | 13,80% | 14,50% | 14,10% | 13,40% | 13,95% | 1,10% | [%] |
| 2 | 13,90% | 13,50% | 14,00% | 14,30% | 13,93% | 0,80% | |
| 3 | 14,20% | 13,90% | 14,20% | 14,40% | 14,18% | 0,50% | |
| | | | | | 14,02% | 0,80% | |



Anexo F. Fotografías

MOTOR ISUZU C - 190



F 1. Motor, radiador, base.



F 2. Motor: bomba de inyección



F 3. Volante, acople, polea, banda.



F 4. Panel de control.

VENTILADOR CENTRIFUGO BP – AL, 17000 cfm y 4” c.d.a.



F 5. Vista lateral



F 6. Ventilador, caracol



F 7. Vista lateral



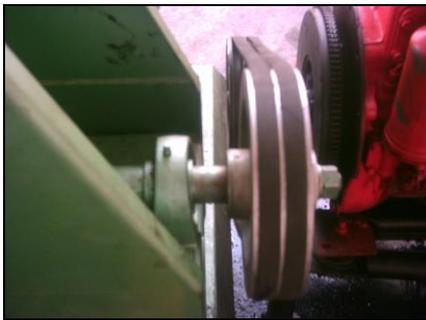
F 8. Álabes del ventilador, disco de sujeción



F 9. Álabes del ventilador



F 10. Poleas y bandas de transmisión



F 11. Alineación Poleas y bandas de transmisión



F 12. Polea y bandas de transmisión



F 13. Polea



F 14. Chumacera.



F 15. Base chumaceras



F 16. Base chumaceras



F 17. Base chumaceras

CAMPANA DIFUSORA



F 18. Campana difusora



F 19. Campana difusora

CÁMARA DE SECADO



F 20. Cámara de secado



F 21. Cámara de secado

MÚLTIPLE DE ADMISIÓN



F 22. Múltiple de admisión.



F 23. Múltiple de admisión.

QUEMADOR QG - 3



F 24. Quemador tipo tobera.



F 25. Orientación del quemador tipo tobera.



F 26. Entrada de la línea de alimentación.



F 27. Ventilador axial del quemador.



F 28. Ventilador axial y motor del quemador.



F 29. Motor eléctrico del quemador.



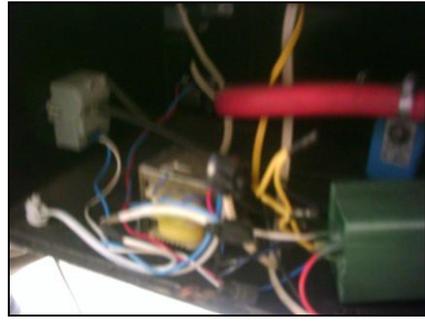
F 30. Suministro de gas interior del quemador.



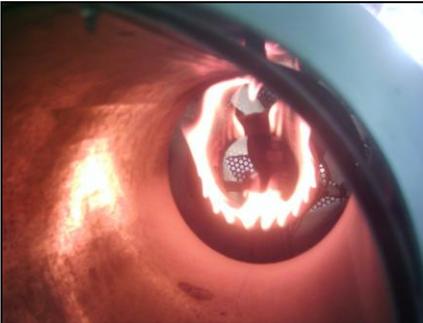
F 31. Suministro de gas interior del quemador.



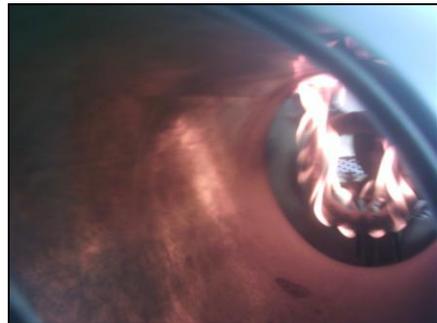
F 32. Electrodos de encendido (chispa).



F 33. Componentes eléctricos del quemador.



F 34. Purga de la línea de alimentación.



F 35. Purga de la línea de alimentación.



F 36. Interior del quemador tipo tobera.



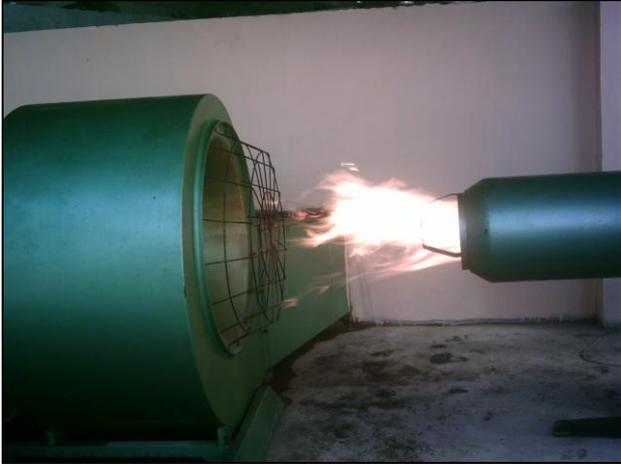
F 37. Placa concentradora de calor.



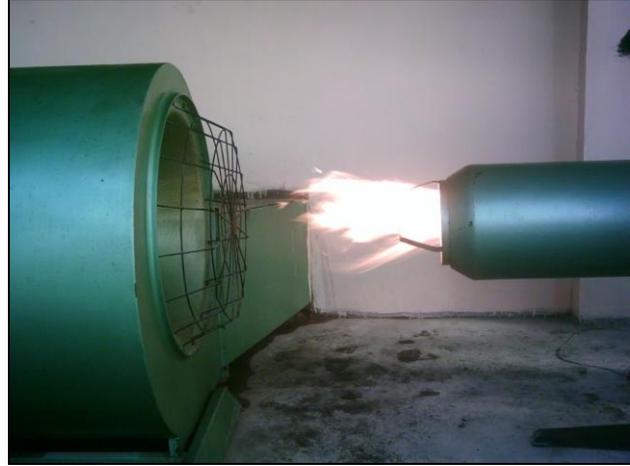
F 38. Manómetro línea de alimentación.



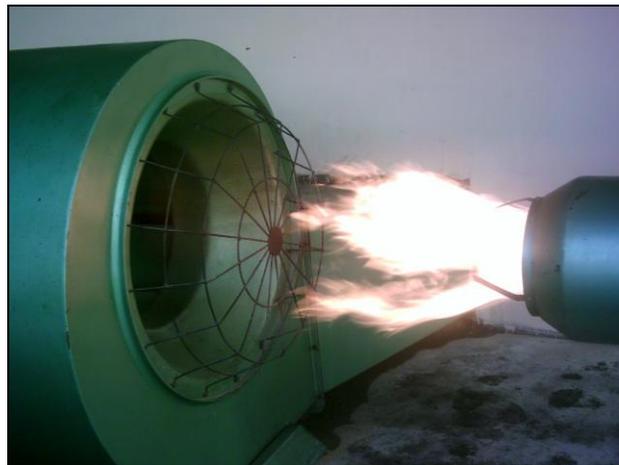
F 39. Manómetro línea de alimentación.



F 40. Conjunto quemador – ventilador en operación.



F 41. Conjunto quemador - ventilador en operación..



F 42. Conjunto quemador - ventilador en operación..

BIBLIOGRAFÍA

- NONHEBEL, G y MOSS, A, El Secado de sólidos en la industria Química. Traducido del inglés por Marcelo Terrizazo. Primera ed. España, Reverté, 1979. 343p.

- Brooker D B. Bakker-Arkema F W and Hall C W, Drying Cereal Grains. Westport: Avi Publishing. 1974. 265 p.

- SHIGLEY, JE y MISCHKE, CR. Diseño en Ingeniería Mecánica. Traducido del inglés por Francisco Paniagua. 5ta ed. México, MacGraw Hill, s.f. pp 133-144.

- INCROPERA, F y DE WITT, D, Fundamentos de Transferencia de Calor. Traducido del inglés por Ricardo Cruz. 4ta ed. México, Prentice Hall. 1999. pp. 2-25. pp. 44-50. pp. 284-331. p. 833.

- MARKS, Manual del Ingeniero Mecánico. Traducido del inglés. 2da ed. México, MacGraw Hill, s.f. v1. pp.4_56-4_58. v2. p. 9_82. v3. pp. 14_50-14_52. pp. 17_21-17_28.

- MATAIX, C, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Primera ed. México, Mexgraphic, 1981. pp. 225-230.

- MOTT, R, Mecánica de Fluidos Aplicada. Traducido del inglés por Carlos Cordero Pedraza. 4ta ed. México, Prentice Hall, 1996. pp. 267-280, pp. 351-365, pp. 492-498.

- DOSSAT, R, Principios de Refrigeración. Traducido del inglés por Armando Garza Cárdenas. 2da ed. México, Continental, 1997. pp. 192-198.

- PITA, E, Acondicionamiento de Aire. Principios y Sistemas. Traducido del inglés por Virgilio González Pozo. Primera ed. México, Continental, 1998. pp. 178-204, pp. 215-249, pp. 279-291.

- KERN, D, Procesos de Transferencia de Calor. Traducido del inglés por Ing. Nicolas Marino Ambrossi. Primera ed. México, MacGraw Hill, 1992. pp. 660-661.
- ANDRANGO, M. Estadística Básica. Primera ed. S.L. 133p.
- PAZMIÑO, I. Metodología de la investigación científica. Primera ed. Quito. Gráficas Fuentes. 1997. pp. 70-82.
- DE DIOS, C.A. Historia de las Cosechadoras de Granos. Inédito.1984. 10 Capítulos.
- PASCUAL M. J. Análisis de la Higroscopía de los Granos y Termodinámica del Aire. Jornadas de Secado y Aireación de Granos. Bolsa de Cereales de Buenos Aires, diciembre 1984. pp. 38-80 .
- INDUHORST, Catálogo de Productos. Primera ed. Quevedo-Ecuador, s.f, pp.6-15.
- <http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/VLIBRARY/X0059S/X0059S00.HTM>. Secado de granos a altas temperaturas, Español, 2005.
- http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/T0395S/T0395S00.htm. El maíz en la nutrición humana, Español, 2005.
- <http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/VLIBRARY/X0028S/X0028S00.HTM>. Secado de granos y secadoras, Español, 1998.
- <http://www.isuzu.com>
- Psyfunc Psychrometric Functions Calculation Demo. Software de cálculo de las propiedades psicrométricas del aire para Excel de Linric Company. 2002.