



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA.

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA.

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO.**

AUTOR: PAGUAY ORTIZ, RODRIGO XAVIER.

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR PARA PIEZAS DE
CERÁMICA BLANCA MEDIANTE EL USO DE CONVECCIÓN FORZADA
Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE AMBIENTE.**

DIRECTOR: ING. OLMEDO, FERNANDO.

CODIRECTOR: ING. GUASUMBA, JOSÉ. MSc.

SANGOLQUÍ, DICIEMBRE DE 2014.

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR PARA PIEZAS DE CERÁMICA BLANCA MEDIANTE EL USO DE CONVECCIÓN FORZADA Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE AMBIENTE**” fue realizado en su totalidad por Rodrigo Xavier Paguay Ortiz, como requerimiento previo para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Sangolquí, diciembre de 2014.

Ing. Fernando Olmedo.

DIRECTOR

Ing. José Guasumba, MSc.

CODIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, PAGUAY ORTIZ RODRIGO XAVIER

DECLARO QUE:

El proyecto de grado titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR PARA PIEZAS DE CERÁMICA BLANCA MEDIANTE EL USO DE CONVECCIÓN FORZADA Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE AMBIENTE**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas y notas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este proyecto es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, diciembre de 2014.

Rodrigo Xavier Paguay Ortiz.

CC: 171583194-5

AUTORIZACIÓN

Yo, PAGUAY ORTIZ RODRIGO XAVIER

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el proyecto de grado titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR PARA PIEZAS DE CERÁMICA BLANCA MEDIANTE EL USO DE CONVECCIÓN FORZADA Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE AMBIENTE**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, diciembre de 2014.

Rodrigo Xavier Paguay Ortiz.

CC: 171583194-5

DEDICATORIA.

Con amor a mi madre Lourdes, quien siempre ha sido mi fiel amiga, compañera y cómplice.

A mi padre Jorge, mi primer héroe, mi mentor y ejemplo de vida.

A mi hermano Andrés, mi mejor amigo y la persona que más quiero y en quien más confié en este extraño lugar al que llamamos mundo. Y a su pequeño hijo Adriel la nueva alegría de nuestro hogar.

Con cariño a mi familia, quienes siempre han estado pendientes de mí, sepan que los quiero mucho y a mis amigos, quienes enfrentaron, están enfrentando o enfrentarán una lucha como esta, sepan que lo importante no es la meta sino el camino.

Con admiración quiero dedicar, este mi primer trabajo a todas las personas que han albergado en su mente y corazón un sueño, y han dedicado o están dedicando su vida y sus esfuerzos en hacerlo realidad sin importar las dificultades, sepan que en personas como ustedes encontré la inspiración para desarrollar este trabajo.

Rodrigo Xavier Paguay Ortiz.

AGRADECIMIENTOS.

A Dios y mi Virgen Dolorosa, quienes estuvieron siempre a mi lado guiándome en los momentos más difíciles de mi vida y siempre me hicieron sentir que no estaba solo.

A mi madre Lourdes, por toda la paciencia y el amor que me ha brindado en estos veinte y cinco años de vida, no me alcanzará la vida para regresarte todo lo que me has brindado. A mi padre Jorge, por la confianza, las enseñanzas y el excelente ejemplo de vida, no he conocido una persona más fuerte y valiente que tú. A mi hermano Andrés, por todos los momentos compartidos, siempre encontré en tu compañía las respuestas a mis problemas, siempre supiste como hacerme sentir mejor y nunca me has dejado solo. Mis mejores recuerdos están contigo.

A mi familia, quienes estuvieron cerca y pendientes de mí, estoy muy agradecido por los buenos momentos y los consejos compartidos. A mis amigos de toda la vida "DIXZ" y Javier "Sambo JR" los llevo en los recuerdos más profundos de mi infancia y adolescencia. Hemos sido cómplices en más de una locura. A mis amigos Lenin, Marco y Diego y a mis amigas Karina y Gaby de ustedes aprendí invaluable cosas y su amistad hizo de mi estancia en la universidad una experiencia inolvidable. Por último a mi amigo Miguel Calle gracias por compartir tu pasión por la lectura conmigo ha sido mi mejor herramienta.

A mis tutores Ingeniero Fernando Olmedo e Ingeniero José Guasumba, gracias por la paciencia y el tiempo dedicado en el desarrollo y culminación de este proyecto.

Rodrigo Xavier Paguay Ortiz

ÍNDICE GENERAL.

CONTENIDO.	PÁG
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.	iv
AGRADECIMIENTOS.	v
ÍNDICE GENERAL.	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
ÍNDICE DE GRÁFICAS.	xxi
ÍNDICE DE TABLAS.	xxii
LISTADO DE ANEXOS	xxiv
NOMENCLATURA.	xxv
RESUMEN.....	xxxii
ABSTRACT.	xxxiii
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. General.....	4
1.3.2. Específico.	4

1.4.	ALCANCE.....	5
1.5.	JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	6
CAPÍTULO 2.....		9
MATERIALES CERÁMICOS.....		9
2.1.	LOS CERÁMICOS.....	9
2.2.	CERÁMICOS TRADICIONALES.	10
2.3.	CERÁMICOS DE INGENIERÍA.	13
2.3.1.	Alúmina (Al_2O_3).	14
2.3.2.	Nitruro de Silicio (Si_3N_4).	14
2.3.3.	Carburo de Silicio (SiC).	14
2.3.4.	Zirconia (ZrO_2).	15
2.4.	FABRICACIÓN DE CÉRAMICA TRADICIONAL.	15
2.5.	LAS CARACTERÍSTICAS DE LA ARCILLA.	16
2.6.	COMPOSICIONES DE LOS PRODUCTOS DE LA ARCILLA.	17
2.7.	TÉCNICAS DE FABRICACIÓN (CONFORMADO).....	18
2.7.1.	Conformado Hidroplástico.	19
2.7.2.	Prensado en seco.	20
2.7.3.	Conformado en barbotina.	21
2.8.	SECADO Y COCCIÓN.	24
2.8.1.	Secado.....	24
2.8.2.	Cocción.....	27
2.9.	PREPARACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL PRODUCTO.	28

CAPÍTULO 3.....	29
MARCO TEÓRICO.....	29
3.1. INTRODUCCIÓN A LAS OPERACIONES DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE.	29
3.2. MEZCLAS DE GAS-VAPOR.....	30
3.3. AIRE SECO Y AIRE ATMOSFÉRICO.	30
3.3.1. Humedad absoluta (w).....	31
3.3.2. Humedad Relativa (HR).....	31
3.3.3. Consideraciones entre humedad absoluta y humedad relativa.....	32
3.3.4. Temperatura de Bulbo Seco (T_{BS}).	32
3.3.5. Temperatura de Punto de Rocío (T_{PR}).....	32
3.3.6. Temperatura de Bulbo Húmedo (T_{BH}).....	33
3.3.7. Volumen Específico (v).....	34
3.3.8. Densidad (ρ).	34
3.3.9. Calor Específico (C_p).....	35
3.3.10. Entalpia (h).	35
3.4. LA CARTA PSICROMÉTRICA.	36
3.4.1. Lectura Sobre la Carta Psicrométrica.	37
3.5. PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE.	39
3.5.1. Balance de Masa en Sistemas de Acondicionamiento de Aire.	40
3.5.2. Balance de Energía en Sistemas de Acondicionamiento de Aire. .	40
3.5.3. Calentamiento y Enfriamiento Simple ($w = \text{constante}$).	41
3.6. INTRODUCCIÓN A LA TRANSFERENCIA DE CALOR.....	43
3.6.1. Calor Latente.	43

3.6.2.	Calor Sensible.	43
3.6.3.	Calor y Temperatura.....	44
3.7.	FUNDAMENTOS DE TRASNFERENCIA DE CALOR.....	44
3.7.1.	Conducción.....	46
3.7.2.	Convección.....	47
3.7.3.	Radiación.....	49
3.8.	RESISTENCIA TÉRMICA EN LA PARED COMPUESTA.....	51
3.8.1.	Resistencia Térmica en Conducción.....	52
3.8.2.	Resistencia térmica en Convección.....	52
3.8.3.	Resistencia Térmica en Radiación.	53
3.8.4.	Resistencia Equivalente en Pared Compuesta.....	53
3.8.5.	Coeficiente global de transferencia de calor.	54
3.8.6.	Cálculo del Flujo de Calor del Sistema.	55
CAPÍTULO 4.....		56
EL SECADO.....		56
4.1.	HÚMEDAD EN LOS PRODUCTOS A SECAR.....	56
4.2.	EL LÍQUIDO ADHERENTE.....	56
4.3.	LÍQUIDO CAPILAR.....	56
4.3.1.	Materiales de poros gruesos.....	57
4.3.2.	Materiales de poros finos.....	57
4.4.	LÍQUIDO HINCHADO.....	57
4.5.	CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS PRODCUTOS A SECAR.	57
4.6.	CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (X_{BH}).	58

4.7.	CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA (X_{BS}).....	59
4.8.	HUMEDAD EN EL EQUILIBRIO (X_{EQ}).....	59
4.9.	CANTIDAD DE AGUA REMOVIDA.	59
4.10.	EL FENÓMENO DE SECADO.....	60
4.11.	TIPOS DE LECHO.....	61
4.11.1.	Estático.....	61
4.11.2.	Móvil.	61
4.11.3.	Fluidizado.	62
4.11.4.	Diluido.....	63
4.12.	CONTACTO FLUIDO Y PRODUCTO A SECAR.	64
4.12.1.	Flujo Paralelo.....	64
4.12.2.	Flujo de Gas Equicorriente.	65
4.12.3.	Flujo de Gas Contracorriente.....	66
4.12.4.	Flujo Perpendicular.....	66
4.12.5.	Circulación Directa.....	67
4.12.6.	Flujo Transversal del Gas.....	67
4.13.	CONSIDERACIONES ENTRE EL CONTACTO DEL FLUIDO Y EL PRODUCTO A SECAR.....	68
4.14.	CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES.....	68
4.14.1.	Secadores Directos.....	69
4.14.2.	Secadores Indirectos.	70
4.14.3.	Secadores Diversos.....	71
4.14.4.	Secadores Dieléctricos.	71
4.15.	VELOCIDAD DE SECADO POR LOTES.....	72
4.16.	PRUEBAS DE SECADO.....	72
4.17.	CURVA DE RAPIDEZ DE SECADO.....	73

4.18.	TIEMPO DE SECADO.....	78
4.18.1.	Tiempo en el Periodo de Rapidez Constante.	79
4.18.2.	Tiempo en el Periodo Decreciente de la Rapidez.....	80
4.18.3.	Tiempo Estimado Total de Secado.....	82
4.19.	MECANISMO DE SECADO POR LOTES.	82
4.20.	SECADO POR CIRCULACIÓN TANGENCIAL.	83
4.21.	CONSIDERACIONES Y EFECTOS DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE SECADO.....	91
4.21.1.	Efecto de la Velocidad del Gas.....	91
4.21.2.	Efecto de la Temperatura del Gas.	91
4.21.3.	Efecto de la Humedad del Gas.	92
4.21.4.	Efecto del Espesor del Sólido que se Está Secando.	92
4.22.	MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD DENTRO DEL SÓLIDO.....	92
4.22.1.	Difusión del Líquido.	93
	CAPÍTULO 5.....	95
	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN.	95
5.1.	DISEÑO.....	95
5.1.1.	Dimensionamiento del Secador.	95
5.1.2.	Análisis del producto.....	97
5.1.3.	Masa seca del producto.....	97
5.1.4.	Masa húmeda del producto.	98
5.1.5.	Cálculo del porcentaje de humedad inicial del producto en base seca.	98

5.1.6.	Cálculo del porcentaje de humedad final del producto en base seca.....	99
5.1.7.	Cálculo de la cantidad de agua a remover en el proceso de secado.....	99
5.1.8.	Cálculo de las propiedades del aire atmosférico.....	100
5.1.9.	Cálculo de las propiedades del aire de secado.....	102
5.1.10.	Cálculo de la humedad absoluta del aire de secado.....	102
5.1.11.	Cálculo de la densidad del aire de secado.....	104
5.1.12.	Calor específico del aire de secado C_p	104
5.1.13.	Cálculo del coeficiente masa velocidad del gas.....	105
5.1.14.	Cálculo del diámetro equivalente del producto para el aire de secado.....	105
5.1.15.	Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección h_{CV} del aire de secado.....	107
5.1.16.	Análisis de la transferencia de calor y transferencia de masa entre el producto y el aire de secado.....	108
5.1.17.	Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor en el producto durante el proceso de secado.....	108
5.1.18.	Cálculo de la temperatura superficial y el contenido de humedad en la superficie del producto.....	111
5.1.19.	Cálculo de la rapidez o flux de secado constante N_c	114
5.1.20.	Estimación del tiempo de secado.....	115
5.1.21.	Estimación de tiempo de secado en el periodo de rapidez constante.....	116
5.1.22.	Estimación de tiempo de secado en el periodo de rapidez decreciente.....	117
5.1.23.	Estimación de tiempo total de secado.....	117

5.1.24. Calor necesario para el secado.	117
5.1.25. Calor útil del producto.	118
5.1.26. Calor sensible del producto.	118
5.1.27. Calor sensible del agua.	119
5.1.28. Cálculo del calor latente del agua.	119
5.1.29. Calor sensible del soporte.	120
5.1.30. Cálculo del calor útil.	122
5.1.31. Pérdidas de calor al ambiente.	122
5.1.32. Cálculo del coeficiente de convección externo.	123
5.1.33. Cálculo del coeficiente de convección interno.	124
5.1.34. Cálculo de las resistencias térmicas del sistema.	126
5.1.35. Cálculo de la resistencia térmica por convección interna.	126
5.1.36. Cálculo de la resistencia térmica por convección externa.	127
5.1.37. Cálculo de la resistencia térmica por conducción de la pared de acero.	127
5.1.38. Cálculo de la resistencia térmica por conducción del aislante térmico.	128
5.1.39. Cálculo de la resistencia equivalente del sistema.	128
5.1.40. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para las pérdidas de calor.	129
5.1.41. Cálculo de las áreas de las paredes del secador.	129
5.1.42. Dimensionamiento de la cámara de acondicionamiento.	129
5.1.43. Área Frontal.	132
5.1.44. Área Posterior.	132
5.1.45. Área Superior.	132
5.1.46. Área Inferior.	132

5.1.47. Área Lateral Derecha.....	133
5.1.48. Área Lateral Izquierda.....	133
5.1.49. Área total.	133
5.1.50. Cálculo de las pérdidas de calor al ambiente.	133
5.1.51. Cálculo del calor necesario para el sistema.....	134
5.1.52. Cálculo de la tasa de aire necesaria para el secado.	134
5.1.53. Cálculo del caudal necesario.....	135
5.1.54. Selección del ventilador.	135
5.1.55. Cálculo de la potencia necesaria para el acondicionamiento.	137
5.2. CONSTRUCCIÓN.....	141
5.2.1. Parte Mecánica.....	142
5.2.2. Parte Eléctrica.	158
5.2.3. Montaje de la parte mecánica y parte eléctrica.....	162
5.3. VALIDACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.	164
5.3.1. Prueba de funcionamiento sin carga de secado.	164
5.3.2. Prueba de secado con intervalo de temperatura.	167
5.3.3. Prueba de secado a temperatura de secado constante.....	171
5.3.4. Prueba de secado a temperatura de secado constante con múltiple carga.	175
5.3.5. Resumen de pruebas de secado.	179
CAPÍTULO 6.....	181
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	181
6.1. CONCLUSIONES.	181
6.2. RECOMENDACIONES.....	182

BIBLIOGRAFÍA.....	183
ANEXO A: CARTAS PSICROMÉTRICAS.....	184
ANEXO B: PLANOS DE CONJUNTO.....	191
ANEXO C: PLANOS DE DETALLE.....	202
ANEXO D: ESQUEMA Y DIAGRAMA ELÉCTRICO.....	221
ANEXO E: CATÁLOGO DE PARTES MECÁNICAS.....	224
ANEXO F: CATÁLOGO DE PARTES ELÉCTRICAS.....	242

ÍNDICE DE FIGURAS.

CONTENIDO.	PÁG
FIGURA 1. Esquema del proceso de producción de la cerámica sanitaria.....	2
FIGURA 2. Composiciones de cerámica fina sobre el diagrama de fases de equilibrio Silice-Leucita-Maulita.	13
FIGURA 3. Estructura de la arcilla caolinita.....	17
FIGURA 4. Métodos de preparación de pastas cerámicas.....	19
FIGURA 5. Procesos de conformado plástico a) Forjado, b) Rolado, c) Extrusión, d) Punsonado.	20
FIGURA 6. Prensado en seco de partículas cerámicas a) y b) relleno, c) prensado y, d) expulsión.	21
FIGURA 7. Conformado en a) sólido, y b) molde de yeso de Paris.....	23
FIGURA 8. Proceso de remoción de humedad a) Cuerpo húmedo , b) Parcialmente seco y, c) Completamente Seco.	26
FIGURA 9. Esquema y descripción de la carta psicrométrica.	37
FIGURA 10. Para aire saturado, se cumple $T_{BS}=T_{BH}=T_{PR}$	38
FIGURA 11. Representación en la carta psicrométrica de los distintos procesos de acondicionamiento de aire.....	39
FIGURA 12. Acondicionamiento de aire con humedad absoluta constante.....	41
FIGURA 13. Modelos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.	45

FIGURA 29. Propiedades psicrometricas del aire a T_{amb} , P_{atm} y HR_{amb} . (Software EES)	101
FIGURA 30. Diagrama del proceso de acondicionamiento del aire sobre la carta psicrométrica ($T_{amb} - T_{sec}$).....	102
FIGURA 31. Propiedades psicrometricas del aire a T_{sec} , P_{atm} y w_{sec} . (Software EES).....	103
FIGURA 32. Esquema del área de sección para el cálculo del diámetro equivalente del producto.	107
FIGURA 33. Esquema para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor del producto.	109
FIGURA 34. Superficies de secado.	109
FIGURA 35. Resolución de la ecuación $w_{sup}(T_{sup})$ sobre la carta psicrométrica.....	113
FIGURA 36. Dimensionamiento del soporte.	120
FIGURA 37. Esquema de las resistencias térmicas del sistema.	122
FIGURA 38. Dimensiones de la vista superior de la cámara de secado para el cálculo del diámetro equivalente.	125
FIGURA 39. Esquema y dimensionamiento de la cámara de acondicionamiento.	130
FIGURA 40. Esquema del secador.....	131
FIGURA 41. Ventilador Soler Palau TD 350/125.	136
FIGURA 42. Propiedades psicrométricas del aire a T_d y P_{atm} . (Software EES)	138

FIGURA 43. Diagrama del proceso de acondicionamiento del aire sobre la carta psicrométrica ($T_{amb} - T_d$).	139
FIGURA 44. Resistencia de espiral Niquel-Cromo. (Electrocromo S.A.).....	140
FIGURA 45. Etapas de Construcción.	141
FIGURA 46. Ensamble secador en Software de CAD/CAM (Vistas e Isometría).	142
FIGURA 47. Etapa de Trazado.....	145
FIGURA 48. Etapa de Corte.	146
FIGURA 49. Corte para la entrada y salida de ducto.....	146
FIGURA 50. Etapa de doblado.	147
FIGURA 51. Etapa de soldado	148
FIGURA 52. Carcasa Externa y estructura interna del secador.	148
FIGURA 53. Etapa de trazado y corte de la lana de roca.....	149
FIGURA 54. Construcción del Sanduche.	150
FIGURA 55. Instalación de las bisagras.	151
FIGURA 56. Relleno de lana de roca para la puerta.	151
FIGURA 57. Unión del Sanduche.	152
FIGURA 58. Perforaciones para la tapa posterior.	152
FIGURA 59. Instalación de tuercas.	153
FIGURA 60. Instalación de las ruedas.....	153
FIGURA 61. Secador antes del proceso de pintado y montaje.	154
FIGURA 62. Limpiado de las caras con antioxidante.	155
FIGURA 63. Masillado en la carta superior y trasera.....	155

FIGURA 64. Masillado en la cara frontal.	156
FIGURA 65. Aplicación de fondo gris y fondo crema.....	156
FIGURA 66. Empapelado de los bordes.....	157
FIGURA 67. Secador después del pintado y barnizado.	157
FIGURA 68. Controlador de temperatura IBEST TCM-SR7.	159
FIGURA 69. Termocupla tipo K.	159
FIGURA 70. Relé de estado sólido IBEST SSR-40A.....	160
FIGURA 71. Switch ON/OFF PWNS 30[A]-3.75[KW]-600[V].....	160
FIGURA 72. Tablero de control Eléctrico.....	162
FIGURA 73. Prototipo secador terminado cara frontal interna y externa.	163
FIGURA 74. Prototipo secador terminado cara lateral derecha.....	163
FIGURA 75. Pieza de cerámica para la prueba 1.....	167
FIGURA 76. Pieza de cerámica para la prueba 2.....	171
FIGURA 77. Piezas de cerámica para la prueba 3.	175
FIGURA 78. Piezas para pruebas de secado.	179

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

CONTENIDO.	PÁG
GRÁFICA 1. Industria Cerámica en el Ecuador.....	7
GRÁFICA 2. Gráficas de secado por lotes a condiciones constantes.....	73
GRÁFICA 3. Curvas normalizadas de rapidez de secado de diferentes tipos de materiales.	75
GRÁFICA 4. Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constante.....	78
GRÁFICA 5. Periodo de rapidez decreciente controlada por la difusión.....	93
GRÁFICA 6. Construcción de la Gráfica de Rapidez de Secado.	116
GRÁFICA 7. Gráfica de la prueba sin carga de secado.	166
GRÁFICA 8. Prueba de Secado 1.....	170
GRÁFICA 9. Prueba de Secado 2.....	174
GRÁFICA 10. Prueba de Secado 3.....	178

ÍNDICE DE TABLAS.

CONTENIDO.	PÁG
TABLA 1. Número y porcentaje de industrias cerámicas de acuerdo al tipo.....	7
TABLA 2. Composiciones químicas de algunas arcillas.	11
TABLA 3. Algunas Composiciones químicas triaxiales en cerámica fina.....	12
TABLA 4. Propiedades Psicrométricas del Aire a T_{amb} , P_{atm} y HR_{amb}	101
TABLA 5. Propiedades Psicrométricas del Aire a T_{sec} y P_{atm}	104
TABLA 6. Propiedades Termofísicas del Producto.	110
TABLA 7. Propiedades Termofísicas del Soporte.	111
TABLA 8. Valores para la construcción de la recta de la ecuación $w_{sup}(T_{sup})$	113
TABLA 9. Solución para la ecuación $wf(T_{sup})$	113
TABLA 10. Contenido crítico de humedad y en el equilibrio para la cerámica blanca.	115
TABLA 11. Dimensiones del soporte.	121
TABLA 12. Cuadro de los valores de las interpolaciones de las propiedades termofísicas del aire a $T_m=311[^\circ K]$	124
TABLA 13. Dimensiones interiores del conjunto cámara de secado y cámara de acondicionamiento del secador.....	131

TABLA 14. Propiedades Psicrométricas del Aire a T_d y P_{atm}	139
TABLA 15. Descripción de Materiales Construcción Mecánica.....	144
TABLA 16. Descripción de Materiales Construcción Eléctrica.	158
TABLA 17. Consumo Energético por hora.	164
TABLA 18. Resumen Prueba del Secador sin Carga.....	165
TABLA 19. Especificaciones Prueba 1.....	168
TABLA 20. Resumen Prueba de Secado 1.....	169
TABLA 21. Especificaciones Prueba 2.....	172
TABLA 22. Resumen Prueba de Secado 2.....	173
TABLA 23. Especificaciones Prueba 3.....	176
TABLA 24. Resumen Prueba de Secado 3.....	177
TABLA 25. Resumen de Pruebas de Secado.	180

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A: Cartas Psicrométricas.

ANEXO B: Planos de Conjunto.

ANEXO C: Planos de Detalle.

ANEXO D: Diagrama y Esquema Eléctrico.

ANEXO E: Catálogo de Partes Mecánicas.

ANEXO F: Catálogo de Partes Eléctricas.

NOMENCLATURA.

SÍMBOLOGÍA.

ag	Agua.
A	Área.
A	Área total te secado.
Ab	Área de la base.
A_{cs}	Ancho cámara de secado.
alr	Alrededores.
A_m	Área promedio de secado.
A_p	Ancho producto.
As	Aire seco.
A_s	Ancho soporte.
A_u	Área que no se está secando.
C_p	Calor específico.
E	Energía.
	Emisividad.
E_E	Energía en la entrada.
e_p	Espesor del producto.
E_s	Energía en la salida.
e_s	Espesor del soporte.
w	Diámetro.

CONTINUA

W_{eq}	Diámetro equivalente.
W_{eqsec}	Diámetro equivalente se secado.
G	Coeficiente masa velocidad del gas.
h	Coeficiente de convección.
h	Entalpía.
h_{as}	Entalpía del aire seco.
H_{cs}	Altura cámara de secado.
h_{cv_s}	Coeficiente convectivo de secado.
h_{fg}	Entalpía de vaporización.
HR	Humedad relativa.
h_R	Coeficiente de radiación.
H_s	Altura soporte.
h_{va}	Entalpía del vapor de agua.
K	Conductividad térmica
K_Y	Coeficiente de transferencia de masa.
L	Espesor de pared.
L_{cs}	Largo cámara de secado.
Le	Número de Lewis.
L_p	Largo producto.
L_s	Largo soporte.
M	Masa.
M_{as}	Masa de aire seco.

CONTINUA

M_H	Masa humedad.
M_p	Masa del producto.
M_s	Masa seca.
M_T	Masa total.
M_{va}	Masa de vapor de agua.
€_l 1	Volumen específico.
N	Velocidad de secado.
N_C	Velocidad de secado constante.
P	Potencia.
p_{as}	Presión parcial del aire seco.
p_g	Presión de saturación.
Pr	Numero de Prandlt.
p_T	Presión total.
p_{va}	Presión parcial del vapor de agua.
Q	Caudal.
q_{CD}	Calor de conducción.
q_{CV}	Calor de convección.
Q_L	Calor latente.
q_R	Calor de radiación.
QS	Calor sensible.
q_T	Calor total.
R_{CD}	Resistencia conductiva.

CONTINUA

R_{CV}	Resistencia convectiva.
Re	Número de Reynolds.
R_{eq}	Resistencia equivalente.
R_R	Resistencia a la radiación.
Sc	Numero de Schmidt.
T	Temperatura de aire atmosférico.
t	Tiempo.
T_{air}	Temperatura de los alrededores.
T_{BH}	Temperatura de bulbo húmedo.
T_{BS}	Temperatura de bulbo seco.
T_{fl}	Temperatura de fluido.
T_G	Temperatura del gas.
T_{PR}	Temperatura de punto de rocío.
t_{RC}	Tiempo de secado en el régimen de rapidez constante.
t_{RD}	Tiempo de secado en el régimen decreciente de la rapidez.
T_{sup}	Temperatura superficial.
t_T	Tiempo total estimado de secado.
U	Coefficiente global de transferencia de calor.
v	Velocidad.
va	Vapor de agua.
V_{cs}	Volumen cámara de secado.
V_p	Volumen del producto.

CONTINUA

w	Humedad absoluta.
W	Trabajo.
w_G	Contenido de humedad absoluta del gas.
w_{sec}	Humedad del aire de secado.
w_{sup}	Contenido de humedad en la superficie.
X_{BH}	Contenido de humedad en base húmeda.
X_{BS}	Contenido de humedad en base seca.
X_C	Contenido crítico de humedad.
X_{eq}	Contenido de humedad en el equilibrio.
X_f	Contenido de humedad final.
X_i	Contenido de humedad inicial
M_{ag}	Cantidad de agua removida.
ΔT	Variación de temperatura.
	Viscosidad dinámica.
ρ	Densidad.
	Constante de Stefan Boltzman.

UNIDADES.

Unidad de temperatura termodinámica.	Kelvin	[°K]
Unidad de temperatura termodinámica.	Celsius	[°C]
Unidad de tiempo.	Segundos	[s]
Unidad de longitud.	Metro	[m]
Unidad de masa.	Kilogramo	[Kg]
Unidad de intensidad de corriente eléctrica.	Amperio	[A]
Unidad de cantidad de sustancia.	Mol	[mol]
Unidad de presión.	Pascal	[Pa]
Unidad de energía, trabajo y calor.	Joule	[J]
Unidad de potencia.	Vatio	[W]
Unidad de potencial eléctrico.	Voltio	[V]
Unidad de resistencia eléctrica.	Ohmio	[]
Unidad de área.	Metro cuadrado	[m ²]
Unidad de volumen.	Metro cubico	[m ³]
Unidad de densidad.	Kilogramo por metro cubico	[kg/m ³]
Unidad de velocidad.	Metro por segundo	[m/s]

CONTINUA

Unidad de velocidad de transferencia de masa.	Kilogramo por metro cuadrado-segundo	[kg/m ² s]
Unidad de aceleración.	Metro por segundo cuadrado	[m/s ²]
Unidad de momento de fuerza y torque.	Newton metro	[N.m]
Unidad de viscosidad dinámica.	Pascal segundo	[Pa.s]
Unidad de entropía.	Julio por grado kelvin	[J/°K]
Unidad de entalpía.	Joule	[J]
Unidad de calor específico.	Joule por kilogramo grado kelvin.	[J/kg °K]
Unidad de conductividad térmica.	Vatio por metro grado kelvin	[W/m°K]
Unidad de transferencia de calor.	Vatio por metro cuadrado	[W/m ²]

RESUMEN.

El Secado es una de las etapas más importantes en el proceso productivo de la cerámica tradicional y tiene como objetivo la eliminación del excesivo contenido de humedad (agua). Por lo general la humedad contenida en el producto se elimina mediante la evaporación del agua al estar en contacto con un agente secante, en la mayoría de los casos este agente secante es aire atmosférico a condiciones ambientales o aire atmosférico sometido a procesos de acondicionamiento. El proceso de secado para una pieza de gran tamaño en contacto con aire a condiciones ambientales puede durar hasta doce horas, sin embargo es posible y factible disminuir este tiempo mediante el acondicionamiento de aire. La temperatura, velocidad y contenido de humedad absoluta del aire atmosférico; al igual que las dimensiones, espesor, característica de las arcillas y contenido de humedad del producto permiten la estimación del tiempo de secado. El objetivo del presente proyecto es el diseño y construcción de un secador que permita la disminución de los tiempos de secado, para lo cual se necesita de un estudio del fenómeno de secado, las características del producto, curvas de secado, procesos de acondicionamiento de aire y la interacción simultánea de los procesos de transferencia de calor y transferencia de masa.

Palabras claves:

Diseño; construcción; cerámicos; acondicionamiento de aire; secado; curvas de secado; tiempo de secado.

ABSTRACT.

The drying process is one of the most important phases in the traditional ceramic production process, and it has the target of removing the excessive humidity amount inside the product. Generally, the water is in contact with drying agent, and the humidity is removed by evaporation. In most time, the drying agent is atmospheric air under environment conditions, or atmospheric air under hot temperature conditions. The drying process for a big piece in contact with air under environment conditions can take twelve hours; however, it is possible and feasible decrease this time with the use of air under hotter temperature conditions. The temperature, velocity and humidity amount of atmospheric air, and the same time, dimensions, thickness, features clay and humidity amount of product allow the prediction of drying time. The target of this project is the design and construction a drying machine that allow decreasing the drying time. In order to achieve it, is necessary to make a study about drying phenomena, product feature, drying curves, air conditioning process and the simultaneous interaction between the mass transfer processes and the heat transfer processes.

Keywords:

Design; construction; ceramics; air conditioning processes; drying; drying curves; drying time.

CAPÍTULO 1.

GENERALIDADES.

1.1. ANTECEDENTES.

En mi experiencia como pasante en FV - Franz Viegner área andina división sanitarios tuve la oportunidad de ampliar mi conocimiento sobre los diferentes procedimientos y procesos que forman parte del proceso productivo en la fabricación de cerámica sanitaria, el mismo que de manera esquemática se presenta en la **FIGURA 1**, y de entre todos los procesos tuve la oportunidad de relacionarme más con el proceso de secado.

Conviene resaltar que el proceso de secado puede efectuarse en hornos clásicos, o bien al aire es decir, en cuartos o armarios de secado donde existan determinadas condiciones de humedad y temperatura.

Parte de mi aporte como pasante fue el estudio del proceso de secado tanto de manera teórica, recopilando información técnica; y práctica, con el aporte de un pre diseño de un armario de secado nuevo, el cual tenía como objetivo reducir las emisiones de calor al ambiente originadas en el horno túnel, para después ser aprovechadas como fuente principal de calor en el acondicionamiento de aire para el proceso de secado.

Como resultado del análisis y estudio realizado encontré que aun cuando el proceso de secado era eficiente, podía ser mejorado considerablemente si:

- Se realiza un estudio del proceso de secado enfocado en la cerámica.
- Se entienda y apliquen de manera adecuada los conceptos básicos de: operaciones de transferencia de masa y transferencia de calor.

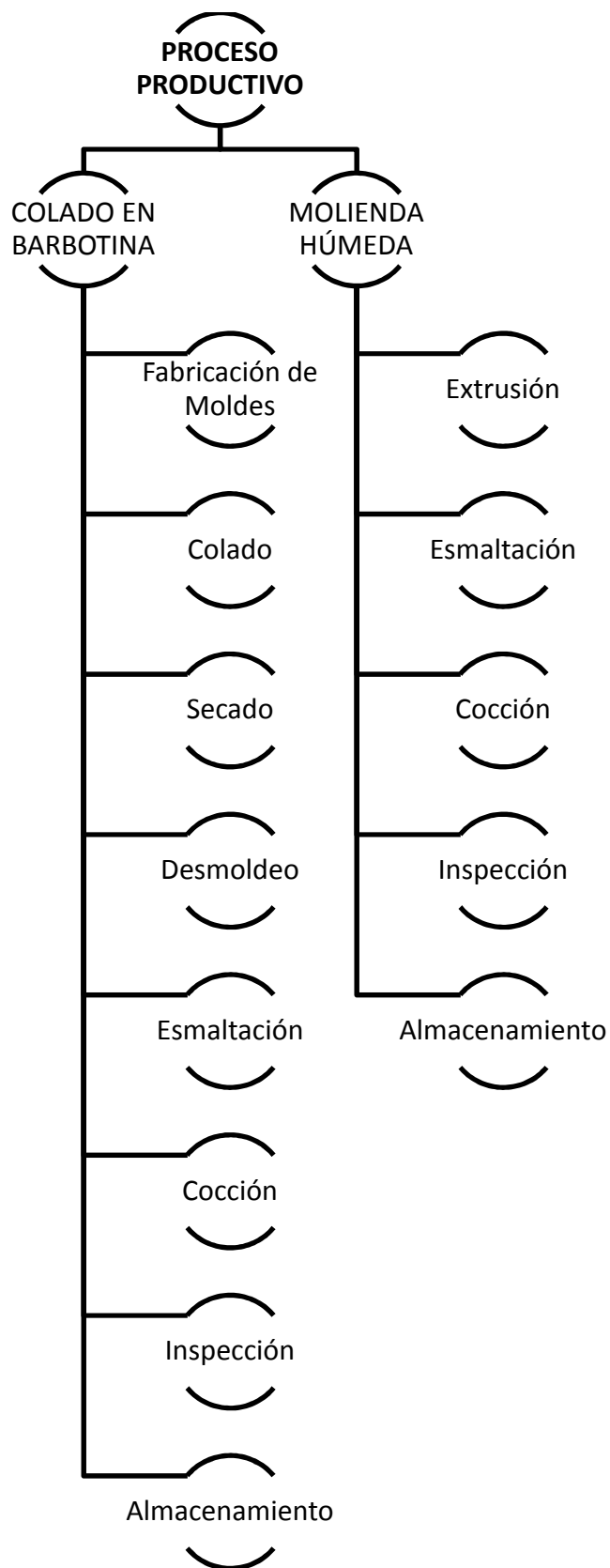


FIGURA 1. Esquema del proceso de producción de la cerámica sanitaria.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Con el proceso de secado que se está llevando a cabo dentro del proceso de producción se tenía buenos resultados en cuanto a la calidad del producto, este en su gran mayoría cumplía con las especificaciones y obtenía las características necesarias para continuar a la siguiente etapa del proceso de producción (esmaltación).

Sin embargo los tiempos de secado se presentan de manera variables; estos tomaban de 7 a 9 horas de duración, lo cual produce una descoordinación en la cadena de producción, esto se traduce a cantidades considerables de producto estancado en bodega esperando para entrar en los cuartos de secado y un desperdicio de tiempo en los procesos siguientes como son esmaltación, cocción, control de calidad y empaquetado, lo que se ve reflejado en pérdida de capital por gastos inventario en la etapa antes del secado, y desaprovechamiento de los recursos en general por motivo de tiempos muertos en los procesos después del secado.

Como resultado del análisis y de estudios sobre el proceso de secado y sus parámetros, se puede concluir con claridad que el problema radica en que:

- No se están considerando las características que tiene el producto antes de entrar en las cámaras de secado, como son: su contenido de humedad en base seca, su geometría, espesor de pared y el valor de carga al secador, esto quiere decir que en ocasiones se mezclan varios tipos de modelos con características totalmente diferentes en cuanto a peso, contenido de humedad y geometría.
- Por otro lado no se están considerando los parámetros propios del proceso de secado como son: la cantidad de aire necesaria para secar determinada cantidad de producto, la misma que para ser

calculada depende, además de las características y especificaciones del producto, de la velocidad, la temperatura y el porcentaje de humedad absoluta del aire en el proceso.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. General.

Diseñar un prototipo para el secado de piezas de cerámica blanca mediante convección forzada y acondicionamiento de aire ambiente, considerando las variables dentro del fenómeno de secado e incluyendo la aplicación de los fundamentos de la transferencia de calor y transferencia de masa.

1.3.2. Específico.

- Realizar un análisis del proceso de secado mediante el estudio de tratados, libros y fuentes de información digital para encontrar las bases teóricas para el posterior diseño.
- Investigar las características del producto a secar (cerámica blanca) mediante un estudio de los materiales cerámicos enfocándose principalmente en el proceso productivo de la cerámica blanca.
- Definir parámetros de diseño mediante el estudio, investigación y análisis del fenómeno de secado y el producto a secar
- Desarrollar el diseño térmico del secador que involucra el diseño y dimensionamiento de una cámara de acondicionamiento, una cámara de secado, la potencia de las resistencias y las características del ventilador.
- Realizar la construcción del prototipo mediante un software para verificar el diseño antes de construcción.

- Desarrollar el conjunto de planos para la construcción de piezas y partes para el posterior montaje.
- Realizar el circuito de control eléctrico el cual incluye un tablero de control donde se ubicaran el control digital, el relé y todas las conexiones eléctricas de entrada y salida como son la señal del sensor de temperatura, señal del control digital y la fuente de alimentación eléctrica.
- Realizar el montaje de partes mecánicas y electrónicas mediante el uso de diagramas y planos.
- Realizar pruebas de funcionamiento con piezas de cerámica blanca y ver el posterior resultado de las mismas.

1.4. ALCANCE.

Este proyecto contempla el diseño y construcción de un secador con capacidad para piezas de hasta 15kg de peso en estado húmedo, el mismo que deberá funcionar a temperaturas de hasta 60°C, para lo cual se ha decidido que para el acondicionamiento de aire (calentamiento) se utilizarán resistencias eléctricas (niquelinas), además de un sistema de ventilación mediante el uso de un extractor en línea helicoidal para el suministro de aire atmosférico hacia la cámara de acondicionamiento. Se pretende utilizar un sistema de control eléctrico compuesto por un control digital, una termocupla y un relé.

El proyecto permitirá desarrollar una guía para el diseño de secadores en base a los requisitos del producto a secar. La finalización de este proyecto, dará un aporte significativo para el desarrollo de grandes y pequeñas industrias cerámicas.

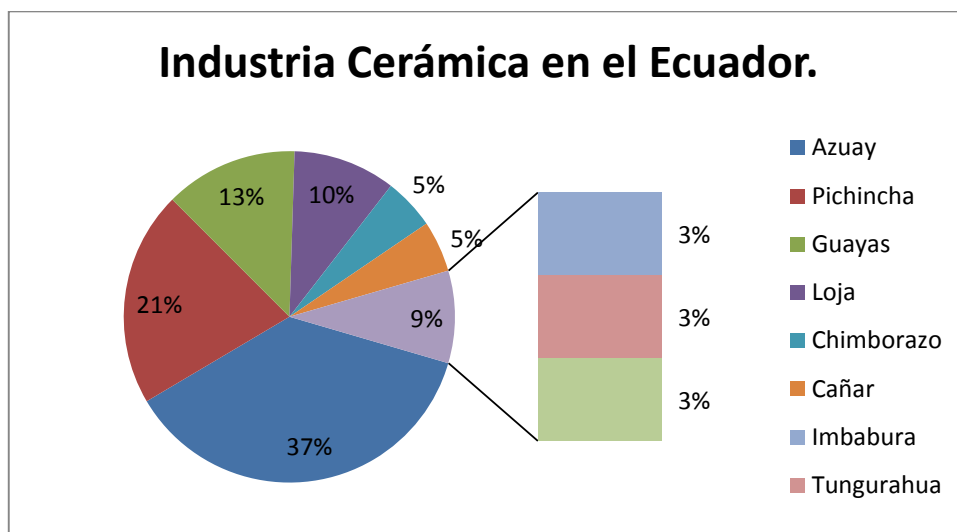
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.

Según la última encuesta de Manufactura y Minería realizada en el año 1999 por el Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos INEC, en el país existen 1502 industrias de manufactura y 45 mineras.

Estas industrias se encuentran registradas dentro de la base de datos del INEC, de acuerdo a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme revisión III (CIIU3), de donde se seleccionaron aquellos códigos que están relacionados a los grupos de actividad económica de la industria cerámica.

Una vez obtenidos los nombres de las empresas, se procedió a determinar el número de ellas por región, dando como resultado que de las 39 industrias, 33 pertenecen a la región sierra (85%) y 6 a la costa (15%), no registrándose ni en el Oriente, ni en Galápagos esta clase de industria.

Se agrupó también a estas industrias cerámicas por provincia tal como se muestra en la **GRÁFICA 1**, determinando que el mayor porcentaje de este tipo de industria se encuentra radicada en la provincia del Azuay (37%) y en la provincia de Pichincha (21%). La provincia del Guayas (13%) es la tercera en porcentaje y la principal de la región costa. En menores porcentajes tenemos a las provincias de Loja (10%), Chimborazo y Cañar (5%), Manabí, Tungurahua e Imbabura (3%).



GRÁFICA 1. Industria Cerámica en el Ecuador.

A estas industrias se las clasificó según su tipo, así como se ve en la **TABLA 1**, en donde se puede apreciar que en el país sólo se ha desarrollado la industria de Cerámica Tradicional, y dentro de este segmento, el mayor porcentaje corresponde a la industria de cerámica Blanca (35%) y Roja (35%).

TABLA 1. Número y porcentaje de industrias cerámicas de acuerdo al tipo.

Tipos de Industria	Cantidad	Porcentaje
Cerámica Blanca	15	35
Cerámica Roja	15	35
Cemento	8	19
Vidrios	4	9
Refractarios	1	2

Fuente: (Cárdenas, Paredes, & Mosquera, 2003).

Como se muestra en la **GRÁFICA 1** las provincias: Azuay 37%, Pichincha 21%, Guayas 13%, son las que abarcan en su mayoría la industria de cerámica, por otro lado se puede observar que en el país solo se ha desarrollado la industria de cerámica tradicional y dentro de este segmento

la cerámica Blanca (cerámicas de mesa, sanitarios o decorativos) y la cerámica Roja (ladrillos huecos, pisos cerámicos rojos y tejas), ambas con 35%; son las de mayor porcentaje.

Por otro lado el gobierno está implementando nuevas políticas de calidad a este tipo de productos, tanto a los producidos en el país y a los que son exportados de otros países como España, Italia, China, Colombia, etc.; el objetivo es que exista una competencia igual entre producto nacional e importado. Personas entendidas en el tema manifiestan que implementadas estas nuevas medidas; el mercado para el producto nacional será mayor lo que implica la necesidad de crecimiento y desarrollo de esta industria.

En vista de un posible crecimiento en esta industria y además de haber tenido la oportunidad de aportar en una de las más importantes empresas de cerámica del país, veo importante el desarrollo y mejora de procesos como el de secado, con el fin de mejorar los procesos productivos.

El presente proyecto tiene como importancia fundamental generar un modelo de cálculo para el diseño de equipos de este tipo, lo que permitiría que sea cada empresa la dueña de su tecnología y que tenga la oportunidad de mejorarla,

CAPÍTULO 2.

MATERIALES CERÁMICOS.

2.1. LOS CERÁMICOS.

Los materiales cerámicos son compuestos químicos o soluciones complejas, constituidos por elementos metálicos y no metálicos. Los materiales cerámicos tienen una amplia variedad de propiedades mecánicas y físicas, sus aplicaciones varían desde productos de alfarería hasta aplicaciones espaciales.

En la mayoría de estas aplicaciones el producto tiene una propiedad esencial o una combinación particular de propiedades que no puede ser obtenida con ningún otro material.

Característica de los materiales cerámicos son sus enlaces iónicos o covalentes, lo que provoca que sean duros, frágiles, con un alto punto de fusión, tienen baja conductividad eléctrica y térmica, buena estabilidad química, y elevada resistencia a la compresión.

Aunque de hecho son materiales frágiles, algunos compuestos con matriz cerámica (como el $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$) tienen valores de tenacidad a la fractura superiores a los de algunos metales (como aleaciones de aluminio endurecidas por envejecimiento) e incluso algunos son superplásticos.

Aunque la mayoría de los productos cerámicos son buenos aislantes eléctricos y térmicos, el SiC y el AlN tienen conductividades térmicas parecidas a las de los metales. Los productos cerámicos como el FeO y ZnO , son semiconductores y, además, han sido descubiertos materiales cerámicos superconductores como el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

Las imperfecciones y defectos son inevitables en la estructura de los cerámicos lo que puede producir que el material falle por su fragilidad; por otro lado el número de imperfecciones difieren en cada pieza cerámica individual lo que significa que las propiedades mecánicas solo pueden describirse de manera estadística.

Por estas razones, el comportamiento mecánico de los materiales cerámicos es menos predecible que el de los metales, por esta característica, su uso en aplicaciones críticas de alta resistencia es limitado.

El presente capítulo tiene como objetivo la descripción de las principales características de los materiales cerámicos tradicionales y de ingeniería, sin embargo, siendo los materiales cerámicos tradicionales los considerados para el desarrollo de este proyecto, se ha realizado un trabajo más detallado de estos, en especial en el proceso de producción; ya que hacia el proceso de secado, que es parte de la cadena de producción, es que va dirigido este proyecto.

2.2. CERÁMICOS TRADICIONALES.

Los cerámicos tradicionales están constituidos por tres componentes básicamente: arcilla, sílice y feldespato. La arcilla está compuesta principalmente por silicatos de aluminio hidratados ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) con pequeñas cantidades de otros óxidos como TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O y K_2O .

En los materiales cerámicos tradicionales las arcillas se pueden trabajar antes de que el material se endurezca por el fuego y constituyen el cuerpo principal del material. La sílice o cuarzo (SiO_2), funde a altas temperaturas y es el material refractario de los cerámicos tradicionales. El feldespato potásico, con composición básica $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, funde a bajas

temperaturas y se transforma en vidrio cuando la mezcla cerámica se somete a alta temperatura y uno de los componentes refractarios.

Productos estructurales de la arcilla tales como ladrillos para la construcción, tuberías de desagüe, tejas de drenaje, tejas de cubiertas y losetas para pisos están hechos de arcilla natural que contiene los tres componentes básicos mencionados anteriormente.

TABLA 2. Composiciones químicas de algunas arcillas.

COMPOSICIONES QUÍMICAS DE ALGUNAS ARCILLAS										
Porcentaje en peso de los óxidos principales										
Tipo de Arcilla	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	H_2O	Perdida por ignición
Caolín	37.4	45.5	1.68	1.3	0.004	0.03	0.011	0.005	13.9	
Arcilla Plástica de Ten	30.9	54	0.74	1.5	0.14	0.2	0.45	0.72	...	11.4
Arcilla Plástica de Ky.	32	51.7	0.9	1.52	0.21	0.19	0.38	0.89	...	12.3

Fuente: (Smith, 1998).

Los productos de cerámica fina como la porcelana eléctrica, porcelana china y sanitarios están formados a partir de arcillas, sílice y feldespato.

Se utiliza el término triaxial porque intervienen los tres componentes principales en sus composiciones.

Rangos típicos de composición para distintos tipos de cerámicos finos se ilustran en el diagrama de fase ternario Sílice-Leucita-Maulita.

TABLA 3. Algunas Composiciones químicas triaxiales en cerámica fina.

ALGUNAS COMPOSICIONES QUÍMICAS TRIAXIALES EN CERÁMICA FINA.					
Tipo de pasta.	Caolín.	Arcilla plástica.	Feldespatos.	Silex.	Otros.
Porcelana dura.	40	10	25	25	
Artículos aislantes eléctricos.	27	14	26	33	
Artículos sanitarios vítreos.	30	20	34	18	
Aislantes eléctricos.	23	25	34	18	
Tejas vítreas.	26	30	32	12	
Porcelana fina semivítrea.	23	30	25	21	
Porcelana inglesa.	25	...	15	22	
Loza para hoteles.	31	10	22	35	38 piezas de huesos 2CaCO ₃
Porcelana dental.	5	...	95	...	

Fuente: (Smith, 1998).

Los cambios que tienen lugar en la estructura de los cuerpos triaxiales durante el proceso de horneado no están entendidos por completo debido a su complejidad.

Las porcelanas triaxiales son satisfactorias como aislantes para 60 ciclos de utilización, pero a altas frecuencias las pérdidas dieléctricas comienzan a ser considerables. Una considerable es el álcalis que deriva del feldespato utilizado como fundente hace que se incremente la conductividad eléctrica y con ello las pérdidas dieléctricas de las porcelanas triaxiales.

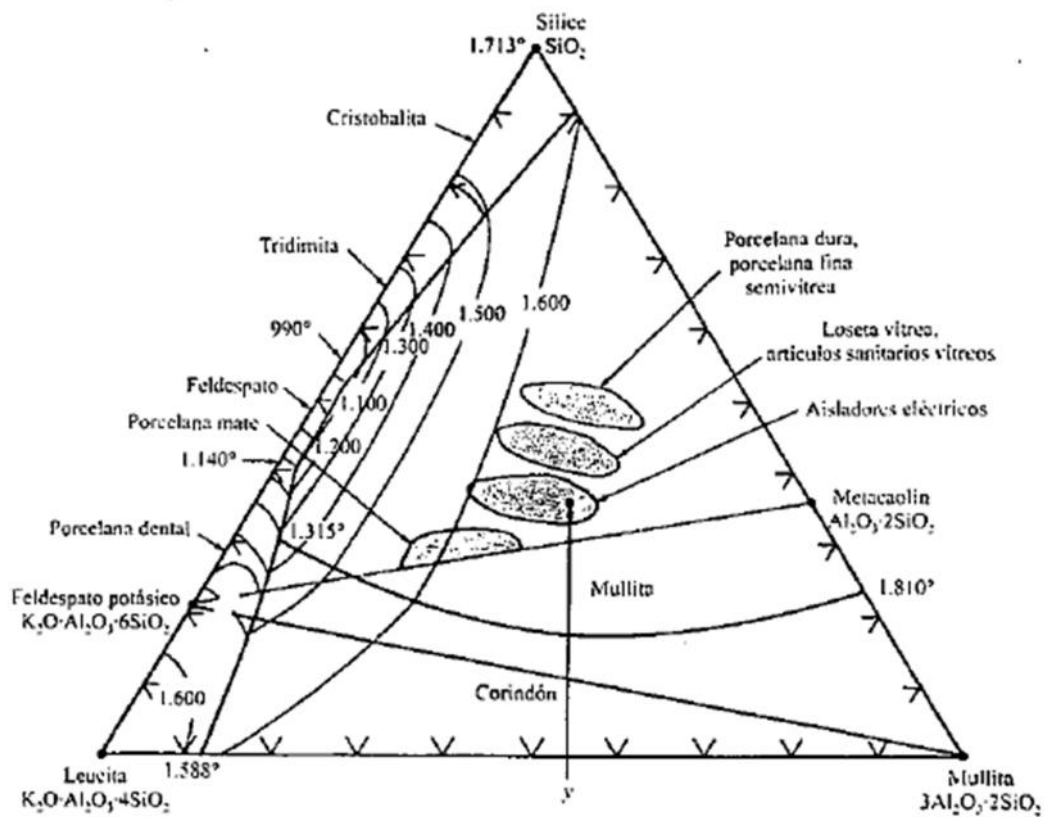


FIGURA 2. Composiciones de cerámica fina sobre el diagrama de fases de equilibrio Silice-Leucita-Maulita.

Fuente: (Smith, 1998).

2.3. CERÁMICOS DE INGENIERÍA.

Los cerámicos de ingeniería están constituidos principalmente por compuestos puros o casi puros: principalmente óxidos, carburos o nitruros. Algunos de los cerámicos de ingeniería más importantes son: alúmina (Al_2O_3), nitruro de silicio (Si_3N_4), carburo de silicio (SiC) y zirconita (ZrO_2) combinados con algunos otros óxidos refractarios.

A continuación se describen algunas propiedades, procesos y aplicaciones de varios materiales cerámicos importantes en ingeniería.

2.3.1. Alúmina (Al_2O_3).

La alúmina se desarrolló originalmente para tubos refractarios y crisoles de alta pureza de utilización a elevadas temperaturas; pero ahora tiene aplicaciones mucho más variadas. Un ejemplo clásico de la utilización de la alúmina es en materiales aislantes de las bujías. El óxido de aluminio se dopa generalmente con óxido de magnesio, se prensa en frío y se sinteriza. La alúmina se emplea frecuentemente para aplicaciones eléctricas de buena calidad, donde se precisan bajas pérdidas dieléctricas y alta resistividad.

2.3.2. Nitruro de Silicio (Si_3N_4).

Los materiales cerámicos con base de nitruro tienen una combinación muy útil de propiedades mecánicas ingenieriles, como resistencia razonable, resistencia al impacto y propiedades refractarias. El Si_3N_4 se disocia significativamente a temperaturas encima de los 1800°C y, por consiguiente, no se puede sintetizar directamente. Las aplicaciones para los cerámicos con base de Si_3N_4 incluyen herramientas de corte, rodillos antifricción y cojines de bolas, así como componentes para motores de explosión o diesel.

2.3.3. Carburo de Silicio (SiC).

Los cerámicos de altas prestaciones del tipo carburo de silicio tienen propiedades muy importantes, ya que su dureza es alta, son inertes químicamente, tienen buena resistencia a la abrasión y a la oxidación a altas temperaturas. Sin embargo, el SiC es relativamente quebradizo por su baja resistencia al impacto y es difícil producir piezas cerámicas densas de grano fino. La resistencia a la flexión del SiC sinterizado es aproximadamente de 460Mpa (67ksi) y su resistencia al impacto varía entre 3 y 5 Mpa m (2.7 a 4.5 ksi in). La mayoría de las aplicaciones más comunes de los cerámicos de SiC se basan en su alta dureza, resistencia química y resistencia a la abrasión. Las aplicaciones en los procesos químicos industriales incluyen

sellados y válvulas, toberas, moldes, láminas para secado y troqueles para alambre. Otras aplicaciones que se aprovechan de su resistencia al desgaste y a la erosión, son los cojinetes de impulso, cojinetes de bolas, bombas de impulsión y troqueles de extrusión. Debido a sus características de resistencia a la termofluencia, se usa en toberas, tubos de intercambiadores de calor y componentes de hornos de difusión.

2.3.4. Zirconia (ZrO₂).

La zirconia pura es polimorfa y experimenta transformaciones desde una estructura tetragonal a otra monoclinica sobre los 1170°C acompañada de una expansión de volumen y posible ruptura. Sin embargo, combinando ZrO₂ con otros óxidos refractarios, tales como CaO, MgO e Y₂O₃, la estructura cubica se puede estabilizar a temperatura ambiente y se han encontrado algunas aplicaciones. Combinando ZrO₂ con el 9% de MgO y tratamientos térmicos especiales, se puede producir una zirconia parcialmente estabilizadas (PSZ) y con una resistencia al impacto especialmente alta.

2.4. FABRICACIÓN DE CÉRAMICA TRADICIONAL.

“Los productos cerámicos son artículos hechos por el hombre, que han sido primero moldeados o modelados usando un amplio número de minerales y rocas, y luego permanentemente endurecidos por el calor” (Adams, 1961).

Los productos a base de arcilla se presentan en dos tipos: productos de arcilla estructurales y las cerámicas. Además de contener arcilla como su materia prima principal muchos de estos productos contienen otros ingredientes. Cada uno de los ingredientes y su composición influyen en los cambios que tienen lugar en el producto durante los diferentes procesos productivos como operaciones de secado y cocción las cuales definen las características de la pieza terminada.

2.5. LAS CARACTERÍSTICAS DE LA ARCILLA.

Los minerales de la arcilla juegan dos papeles fundamentales en los cuerpos cerámicos. El primero, cuando se añade agua, la arcilla se convierte en una masa muy plástica, esta condición se denomina hidroplasticidad, propiedad muy importante en las operaciones de conformado. Adicionalmente los fundentes de la arcilla se fusionan a rangos altos de temperatura. Por lo tanto, una pieza de cerámica densa y fuerte puede producirse durante la cocción sin una completa fusión de tal manera que se mantiene la forma deseada. Este rango de temperatura de fusión dependerá de la composición de la arcilla.

Las arcillas son aluminosilicatos, que está compuesto de alúmina (Al_2O_3) y sílice (SiO_2), que contiene agua ligada químicamente. Tienen una amplia gama de características físicas, químicas, composiciones y estructuras; impurezas comunes incluyen compuestos (normalmente óxidos) de bario, calcio, sodio, potasio, y hierro, y también algo de materia orgánica. Las estructuras cristalinas de los minerales de arcilla son relativamente complicadas; Sin embargo, una característica predominante es una estructura en capas.

Los minerales de arcilla más comunes que son de interés tienen lo que se llama la estructura caolinita. Arcilla caolinita $[\text{Al}_2 (\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{OH})_4]$ tiene la estructura cristalina **FIGURA 3**. Cuando se añade agua, las moléculas de agua se ajustan entre estas láminas en capas y forman una película fina alrededor de las partículas de arcilla. Las partículas son entonces libres para moverse una sobre la otra, lo que representa la plasticidad resultante de la mezcla de arcilla-agua.

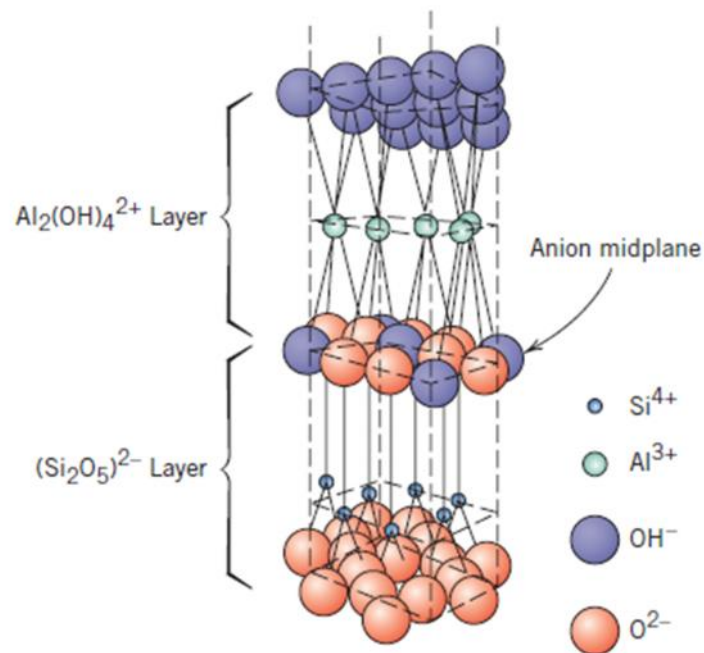


FIGURA 3. Estructura de la arcilla caolinita.

Fuente: (Callister Jr & Rethwisch, 2010).

2.6. COMPOSICIONES DE LOS PRODUCTOS DE LA ARCILLA.

Además de la arcilla, muchos de estos productos (en particular, las cerámicas) también contienen algunos ingredientes no plásticos; los minerales no arcillosos incluyen sílice o cuarzo finamente molido, y un fundente como el feldespato¹. El cuarzo se utiliza principalmente como un material de relleno, ya que es barato, relativamente duro, y no reactivo químicamente. Este experimenta poco cambio durante los tratamientos a altas temperatura debido a que tiene una temperatura de fusión muy por encima de la temperatura normal de cocción; sin embargo cuando el cuarzo se funde tiene la capacidad de formar vidrio.

¹ Sustancia que promueve la formación de una fase vítrea durante el tratamiento térmico de cocción

Cuando el fundente se mezcla con la arcilla forma un cristal que tiene un punto de fusión relativamente bajo. Los feldespatos son algunos de los fundentes más comunes; y son un grupo de materiales de aluminosilicato que contienen iones de K^+ , Na^+ , y Ca^{2+} .

Las características de la pieza acabada están influenciados por las proporciones de los tres constituyentes: arcilla, cuarzo, y el fundente. Una porcelana típica puede contener aproximadamente 50% de arcilla, 25% de cuarzo, y 25% de feldespato.

2.7. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN (CONFORMADO).

Las materias primas usualmente pasan a través de un proceso de molienda en el que se reduce el tamaño de sus partículas, esto es seguido por un proceso de cribado cuyo resultado es un producto en polvo con un tamaño deseado. Para los sistemas de múltiples componentes, los polvos deben estar completamente mezclados con agua y quizás otros ingredientes para dar características de flujo que permita su posterior conformado. La pieza formada debe tener suficiente resistencia mecánica para permanecer intacta durante el transporte, secado, y las operaciones de cocción. Dos técnicas de conformación comunes se utilizan para formar composiciones a base de arcilla: formar hidrolástica y moldeo en barbotina.

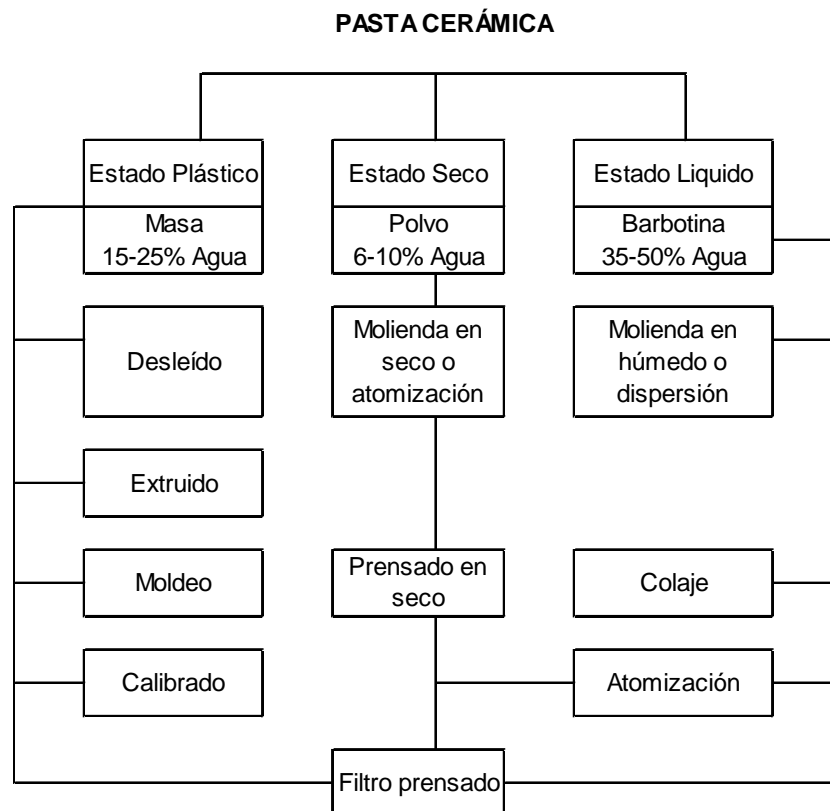


FIGURA 4. Métodos de preparación de pastas cerámicas.

2.7.1. Conformado Hidroplástico.

Cuando se mezcla los minerales de arcilla con agua esta adquiere una composición altamente plástica y flexible lo que permite el moldeo sin producción de grietas. Sin embargo, presentan una resistencia extremadamente baja. La consistencia (relación de arcilla-agua) de la masa hidroplástica debe tener elasticidad suficientemente fuerte para que las piezas formadas no se deformen durante la manipulación y el secado.

La técnica de formación hidroplástica más común es la extrusión **FIGURA 5** literal c), en la cual una masa plástica-rígida es forzada a través del orificio de una boquilla que posee la geometría de una sección transversal deseada. Ladrillos, tuberías, bloques cerámicos y azulejos son comúnmente fabricados por este método. Por lo general, la masas plástica de cerámica es forzada a pasar a través de un troquel por medio de un

tornillo sin fin accionado por un motor, y con frecuencia las piezas se hacen pasar por una cámara de vacío en la cual se elimina el aire y mejora su densidad.

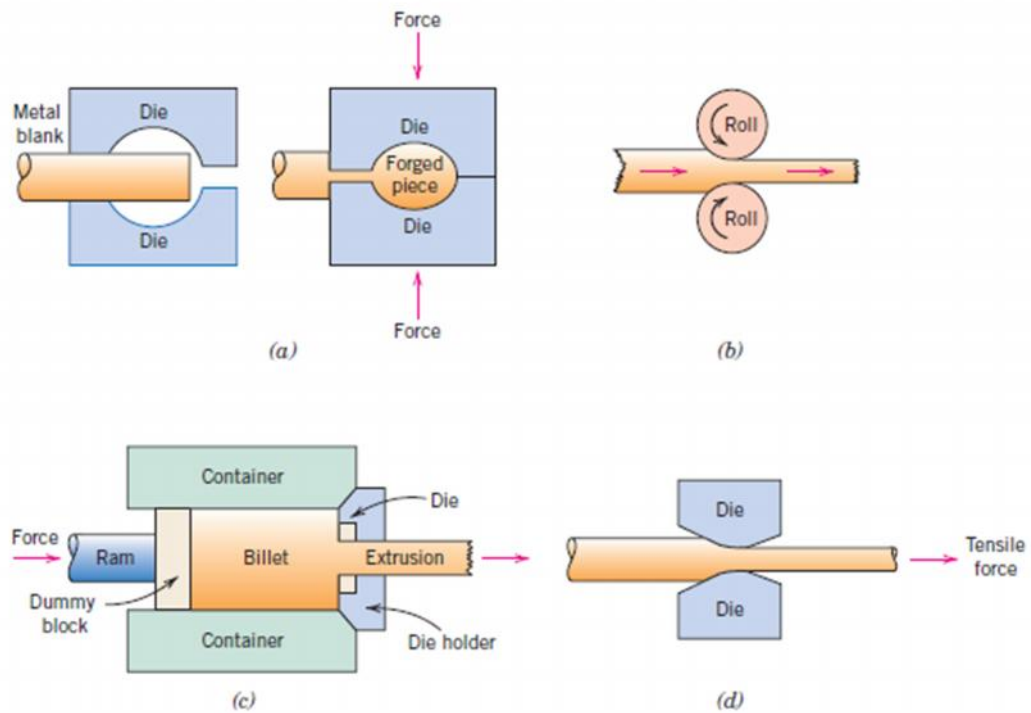


FIGURA 5. Procesos de conformado plástico a) Forjado, b) Rolado, c) Extrusión, d) Punsonado.

Fuente: (Callister Jr & Rethwisch, 2010).

2.7.2. Prensado en seco.

Usado frecuentemente para la producción de refractarios (materiales de alta resistencia térmica) y componentes cerámicos electrónicos. El prensado en seco **FIGURA 6** se puede definir como la compactación uniaxial simultánea y la conformación de un polvo granulado junto con pequeñas cantidades de agua y/o cementadores orgánicos en un troquel.

Después del estampado en frío, las partículas normalmente se calientan (sinterizadas) a fin de que consigan la resistencia y las propiedades microestructurales deseadas. El prensado en seco se utiliza mucho porque permite fabricar una gran variedad de piezas rápidamente con una uniformidad y tolerancia pequeñas.

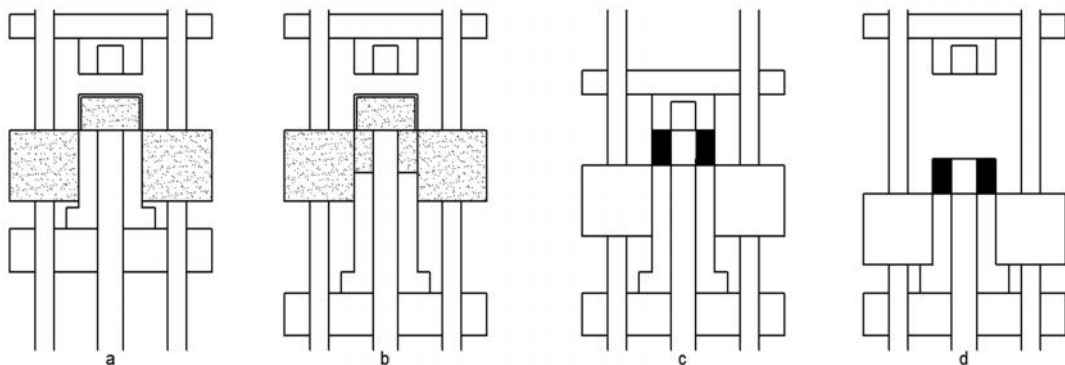


FIGURA 6. Prensado en seco de partículas cerámicas a) y b) relleno, c) prensado y, d) expulsión.

Fuente: (Smith, 1998).

2.7.3. Conformado en barbotina.

La barbotina es una solución de arcilla y otros materiales no plásticos en agua. Cuando se vierte en un molde poroso **FIGURA 7** (comúnmente hecho de yeso de Paris), parte del agua de la barbotina es absorbida por el molde dejando una capa sólida sobre la pared del molde. Este proceso puede continuarse hasta que la sustancia en toda la cavidad del molde se solidifique (colada continua).

Las características de la barbotina son extremadamente importantes; la barbotina debe tener un alto peso específico y sin embargo ser muy fluida y vertible. De estas características depende la relación agua-sólido y otros agentes que se añaden. Una velocidad de colada satisfactoria es un requisito esencial. Además, la pieza de fundición debe estar libre de

burbujas, y debe tener una contracción por secado baja y una resistencia relativamente alta.

Las propiedades del propio molde influyen en la calidad de la pieza colada. Normalmente, el yeso de París, que es económico, relativamente fácil de fabricar en formas intrincadas, y reutilizable, se utiliza como el material del molde. La mayoría de los moldes son artículos en varias partes que deben ser ensamblados antes de la colada. Además, la porosidad del molde puede variar para controlar la velocidad de colada. Formas cerámicas más complejas pueden ser producidas por medio del moldeo en barbotina, estas incluyen artículos sanitarios, lavabos, piezas de arte y utensilios científicos de laboratorio tales como tubos de cerámica.

Las etapas fundamentales del conformado en barbotina se expone a continuación.

- Preparación de un metal cerámico en polvo y de un líquido (generalmente arcilla y agua) en una suspensión estable llamada barbotina.
- Se vierte la barbotina en un molde poroso, generalmente fabricado en yeso, el mismo que permite la absorción parcial de la porción líquida de la barbotina. A medida que se elimina el líquido de la barbotina, se forma una capa de material semiduro contra la superficie del molde.
- Cuando se ha formado un espesor suficiente, se interrumpe el proceso y el exceso de barbotina se desaloja de la cavidad, esto se conoce como escurrido o fundición con drenaje. Alternativamente, la forma de un sólido puede realizarse permitiendo que continúe la colada hasta que la cavidad del molde se rellene por completo, este tipo de moldeo en barbotina se llama fundición compacta.

- Tenemos que dejar secar el material dentro del molde hasta que alcance la resistencia necesaria para manipularlo y retirarlo posteriormente del molde.
- Finalmente, hay que realizar el sinterizado para que consiga las propiedades y la microestructura deseada.

El moldeo por barbotina es ventajoso cuando lo que se requiere son piezas de paredes delgadas y piezas complejas con paredes de espesor constante. Se trata de un proceso económico para desarrollar piezas y obtener producciones reducidas.

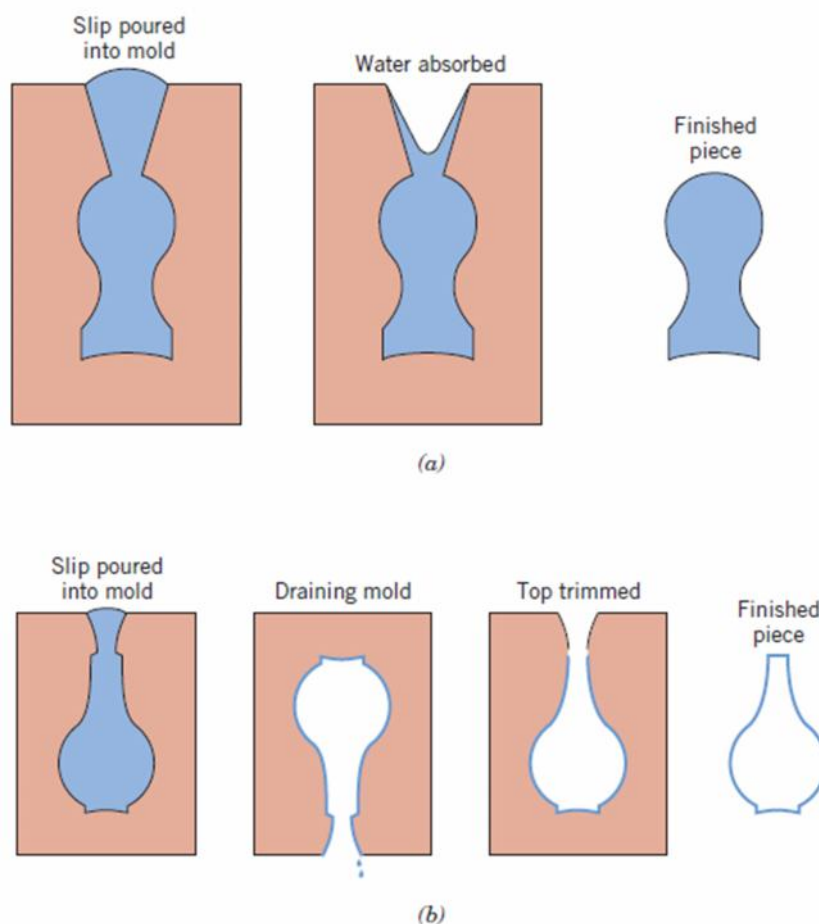


FIGURA 7. Conformado en a) sólido, y b) molde de yeso de Paris.

Fuente: (Callister Jr & Rethwisch, 2010).

2.8. SECADO Y COCCIÓN.

Una pieza de cerámica que se ha formado hidroplásticamente o por barbotina conserva una significativa porosidad y presenta una resistencia insuficiente para aplicaciones más prácticas. Además, todavía puede contener humedad. La humedad se elimina en un proceso de secado. Por otro lado, la densidad y la resistencia se mejoran como resultado de un tratamiento térmico a alta temperatura denominado proceso de cocción.

Un cuerpo que se ha formado y secado, pero no quemado se llama verde. Defectos (por ejemplo, deformación, distorsión y grietas) suelen provocarse durante el secado y la cocción que producen la inutilidad del producto. Estos defectos normalmente son el resultado de las tensiones que se crean a partir de la contracción no uniforme.

2.8.1. Secado.

El propósito del secado de cerámicos es eliminar agua del cuerpo cerámico plástico antes de ser sometidas a altas temperaturas. Generalmente, la eliminación de agua se lleva a cabo a menos de 100°C y puede tardar alrededor de 24 horas para un trozo de cerámica grande.

El objetivo del secado es la reducción del contenido de humedad de las piezas antes de su cocción, es una operación compleja en la que convergen múltiples factores: naturaleza de la arcilla, grado de preparación y homogeneización, tensiones que pueden haber tenido lugar durante el moldeo, diseño y formato de la pieza, uniformidad o desuniformidad de secado, etc.

El tipo de secado que se lleve a cabo influirá en la resistencia y calidad final de la pieza después de su cocción. El secado de una pieza cerámica de cualquier tipo transcurre en dos fases:

- Eliminación del agua a velocidad constante manteniéndose húmeda la superficie de la pieza. En esta etapa se produce una contracción en la pieza igual al agua eliminada.
- Eliminación del agua a velocidad decreciente manteniéndose seca la superficie de la pieza. La contracción de esta etapa es muy pequeña.

Cuando un cuerpo de cerámica a base de arcilla se seca, también experimenta una cierta contracción. En las primeras etapas de secado, las partículas de arcilla están prácticamente rodeadas y separadas una de otra por una fina película de agua. Como avanza el secado y se elimina el agua, la separación entre partículas disminuye, lo que se manifiesta como la contracción. Durante el secado es crítico controlar la tasa de eliminación de agua.

El secado a regiones interiores de un cuerpo se logra mediante la difusión de moléculas de agua a la superficie, donde se produce la evaporación. Si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de difusión, la superficie se seca (y como consecuencia reducir el tamaño) más rápidamente que el interior, con una alta probabilidad de la formación de los defectos antes mencionados. La tasa de evaporación de la superficie debe ser disminuida a, como máximo, la velocidad de difusión del agua; velocidad de evaporación se puede controlar por la temperatura, la humedad, y la tasa de flujo de aire.

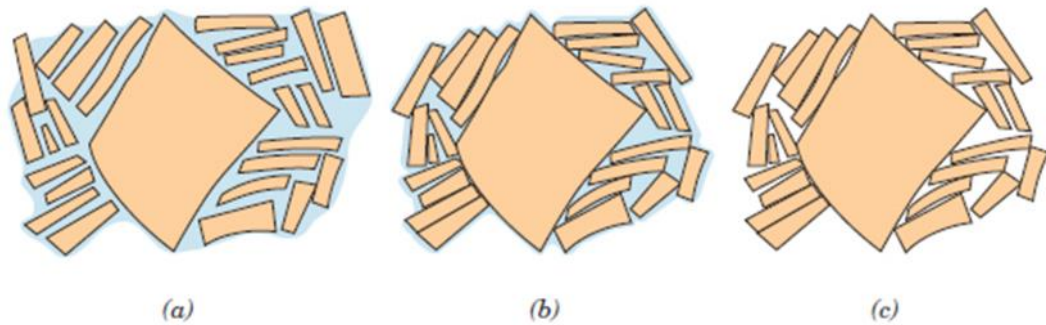


FIGURA 8. Proceso de remoción de humedad a) Cuerpo húmedo, b) Parcialmente seco y, c) Completamente Seco.

Fuente: (Callister Jr & Rethwisch, 2010).

Otros factores también influyen en la contracción. Uno de ellos es grosor del cuerpo; encogimiento no uniforme y la formación de defectos son más pronunciados en piezas gruesas que en las delgadas. El contenido de agua del cuerpo formado es también crítico: cuanto mayor es el contenido de agua, más extensa es la contracción. En consecuencia, el contenido de agua debe mantenerse normalmente tan bajo como sea posible. El tamaño de partícula de la arcilla también tiene una influencia; se mejora la contracción como el tamaño de partícula se reduce. Para minimizar la contracción, el tamaño de las partículas puede aumentarse, o puede añadirse materiales no plásticos que tienen partículas relativamente grandes a la arcilla.

El problema fundamental del secado es evitar que la contracción que sufre la pieza origine agrietamientos y roturas. Este condicionante controla la velocidad de secado ya que un secado excesivamente rápido puede agrietar la pieza. Para eliminar estos defectos en las piezas hay que evitar que los gradientes de humedad en la pieza sean excesivamente elevados.

La energía de microondas también puede ser utilizada para secar artículos de cerámica. Una ventaja de esta técnica es que las altas

temperaturas usadas en los métodos convencionales se evitan; temperaturas de secado pueden mantenerse por debajo de los 50°C (120°F). Esto es importante porque el secado de algunos materiales sensibles a la temperatura debe mantenerse tan bajo como sea posible.

2.8.2. Cocción.

Después del secado, un cuerpo generalmente se quema a una temperatura entre 900 y 1400°C (1650 y 2550°F); la temperatura de cocción depende de la composición y de las propiedades deseadas de la pieza acabada. Durante la operación de cocción, la densidad se incrementa aún más (con una disminución de la porosidad) y la resistencia mecánica se mejora.

Cuando los materiales a base de arcilla se calientan a temperaturas elevadas, se producen algunas reacciones bastante complejas y complicadas. Una de ellas es la vitrificación, la formación gradual de un vidrio líquido que fluye por dentro y llena una parte del volumen de poro. El grado de vitrificación depende de la temperatura y el tiempo de cocción, así como la composición del cuerpo. La temperatura a la que la fase líquida se forma se disminuye mediante la adición de agentes fundentes tales como feldespato. Esta fase fundida fluye alrededor de las partículas no fundidas restantes y rellena los poros como resultado de fuerzas de tensión superficial (o acción capilar); una contracción también acompaña este proceso.

Después de enfriar, esta fase fundida forma una matriz vítrea que resulta en un denso y fuerte cuerpo. Por lo tanto, la microestructura final consiste en una fase vitrificada, partículas de cuarzo que no han reaccionado, y algo de porosidad.

El grado de vitrificación, controla las propiedades que presentara la cerámica a temperatura ambiente; producto de la vitrificación la resistencia,

la durabilidad, y la densidad aumenta y se mejora. La temperatura de cocción determina el grado en que se produce la vitrificación; es decir, la vitrificación se incrementa a medida que se aumenta la temperatura de cocción.

Ladrillos de construcción son normalmente quemados a alrededor de 900°C (1650°F) y son relativamente porosos. Por otra parte, porcelana altamente vitrificada, que se presenta ópticamente transparente, tiene lugar a temperaturas mucho más altas. La vitrificación completa se evita durante la cocción, ya que el cuerpo se vuelve demasiado blando y se derrumbará.

2.9. PREPARACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL PRODUCTO.

Las piezas, ya terminadas, se depositan apiladas en estanterías o encima de las propias piezas y pueden envolverse con plástico retráctil para facilitar su posterior distribución.

Por otro lado, en algunas empresas se humecta el material terminado para aportar la consistencia requerida por el cliente, este proceso se lleva a cabo de dos maneras distintas en función de cada instalación.

- A través del regado del material con manguera.
- Insertando el producto en piscinas ya preparadas para tal hecho.

El almacenamiento puede ser en nave cerrada o a la intemperie. Este proceso puede realizarse de manera manual o mediante la empaquetadora, para la colocación de flejes o retractilado de plástico de los paquetes de material terminado.

CAPÍTULO 3.

MARCO TEÓRICO.

3.1. INTRODUCCIÓN A LAS OPERACIONES DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE.

Las operaciones de acondicionamiento de aire se ocupan de la transferencia de masa interfacial y de energía, que resulta cuando un gas se pone en contacto con un líquido puro, en el cual este es prácticamente insoluble, el propósito de estas abarcan: la humidificación del gas, la deshumidificación y el enfriamiento del gas, mediciones de su contenido en vapor y el enfriamiento del líquido.

En estos casos, la materia transferida entre las fases es la sustancia que forma la fase líquida, que o bien se evapora o bien se condensa. En estos casos, invariablemente, la transferencia de masa estará acompañada de una transferencia simultánea de calor, por ende también deben considerarse las características de entalpia en los sistemas.

Como se mencionó anteriormente las operaciones de humidificación se ocupan de la transferencia de masa interfacial y de energía, y estas abarcan: la humidificación del gas, la deshumidificación y el enfriamiento del gas, mediciones de su contenido en vapor y el enfriamiento del líquido. Sin embargo en el presente apartado no se describirán todas, solo aquellas necesarias para el desarrollo del presente proyecto.

3.2. MEZCLAS DE GAS-VAPOR.

A temperaturas por debajo de la temperatura crítica, a la fase gaseosa de una sustancia se le denomina frecuentemente como vapor. El término vapor implica un estado gaseoso que se encuentra cerca de la región de saturación de la sustancia, lo cual incrementa la posibilidad de condensación durante el proceso.

En ingeniería se estudian varias mezclas de gas-vapor. El presente tratado se refiere exclusivamente la mezcla aire-vapor de agua, que es la mezcla de gas-vapor más común en la práctica. También se estudia el acondicionamiento de aire, que es la principal área de trabajo de las mezclas de aire-vapor de agua.

3.3. AIRE SECO Y AIRE ATMOSFÉRICO.

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y pequeñas cantidades de otros gases. Normalmente, el aire en la atmósfera contiene cierta cantidad de vapor de agua (o humedad) y se conoce como aire atmosférico. Por otro lado, el aire que no contiene vapor de agua se denomina aire seco. Es conveniente tratar al aire como una mezcla de vapor de agua y aire seco, porque la composición del aire seco permanece relativamente constante, pero la cantidad de vapor de agua varía por la condensación y evaporación de los océanos, lagos, ríos, regaderas e incluso del agua del cuerpo humano.

A pesar de que la cantidad de vapor de agua en el aire es pequeña, desempeña un importante papel en la comodidad cotidiana del ser humano y aplicaciones industriales. En consecuencia, es importante tomarlo en cuenta en los dispositivos de acondicionamiento de aire.

3.3.1. Humedad absoluta (w).

Es la cantidad de masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, la relación entre estas cantidades toma el nombre de humedad absoluta o humedad específica del aire, conocida también como relación de humedad y que se representa por medio de w.

$$w = \frac{M_{va}}{M_{as}} \quad (3.1)$$

Dónde:

w: humedad absoluta del aire [kgva/kgas].

M_{va} : masa de vapor de agua [kg].

M_{as} : masa de aire seco en [kg].

Por otra parte si aplicamos la ecuación del gas ideal para cada una de las masas de gas obtenemos la siguiente ecuación:

$$w = 0.622 \frac{p_{va}}{p_T - p_{va}} \quad (3.2)$$

Dónde:

w: humedad absoluta del aire [kgva/kgas].

p_T : presión total aire atmosférico [kPa].

p_{va} : presión parcial del vapor de agua en la mezcla [kPa].

p_{as} : presión parcial del aire seco en la mezcla [kPa].

3.3.2. Humedad Relativa (HR).

La humedad relativa (HR), es un término utilizado para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura y presión de la muestra y se define como la relación

entre presión parcial del vapor de agua en el aire y la presión de saturación del agua a una temperatura dada.

$$HR = \frac{p_{va}}{p_g} \quad (3.3)$$

Dónde:

HR: humedad relativa.

p_{va} : presión parcial del vapor de agua en la mezcla [kPa].

p_g : presión de saturación a una determinada temperatura [kPa].

3.3.3. Consideraciones entre humedad absoluta y humedad relativa.

- A medida que se añade más vapor o humedad, la humedad absoluta crecerá hasta que el aire ya no pueda contener más humedad. En este punto se dice que el aire estará lleno de humedad, y se le denomina aire saturado. Cualquier humedad agregada al aire saturado se condensará.
- La humedad relativa varía entre 0 para aire seco y 1 para aire saturado. Advierta que la cantidad de humedad que el aire puede contener depende de su temperatura. Por lo tanto, la humedad relativa del aire es inversamente proporcional a la temperatura aunque su humedad específica permanezca constante.

3.3.4. Temperatura de Bulbo Seco (T_{BS}).

Es la temperatura del aire atmosférico determinada de forma ordinaria (en condición seca.) por inmersión de un termómetro en el aire atmosférico.

3.3.5. Temperatura de Punto de Rocío (T_{PR}).

La temperatura de punto de rocío T_{PR} se define como la temperatura a la que se inicia la condensación si el aire se enfría a presión constante. En

otras palabras T_{PR} es la temperatura a la cual el aire atmosférico debe enfriarse para alcanzar el estado de saturación, a partir de dicha temperatura un enfriamiento adicional produciría condensado.

$$T_{PR} = T_{sat} \text{ a } p_{va} \quad (3.4)$$

Dónde:

p_{va} : presión parcial del vapor de agua en la mezcla [kPa].

$$p_{va} = \frac{w p_T}{0.622+w} \quad (3.5)$$

Dónde:

T_{PR} : temperatura de punto de rocío [°C].

p_T : presión total del gas [kPa].

w : Humedad absoluta del aire atmosférico [kgva / kgas].

3.3.6. Temperatura de Bulbo Húmedo (T_{BH}).

La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla vapor-gas no saturado. En condiciones apropiadamente controladas, dicha temperatura puede utilizarse para medir la humedad de la mezcla. Con este propósito, un termómetro cuyo bulbo se ha cubierto con un material fibroso humedecido en el líquido, se sumerge en una corriente de la mezcla gaseosa, que se está moviendo rápidamente. La temperatura que indica este termómetro alcanzará finalmente un valor inferior a la temperatura de bulbo seco del gas, si este último no está saturado; y sabiendo esto, la humedad se calcula una vez conocido ese valor.

La temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y temperatura de punto de rocío del aire son idénticas cuando el aire tiene un

contenido de humedad relativa de 1, es decir cuando el aire atmosférico se encuentra saturado de vapor de agua.

3.3.7. Volumen Específico (v).

Es el volumen de masa unitaria de aire seco y de su vapor de agua acompañante a la temperatura y presión dominantes.

$$v = 0.00283 + 0.00456 w T. \quad (3.6)$$

Dónde:

v : Volumen específico [m^3/Kg].

w : Humedad absoluta del aire atmosférico [$kgva / kgas$].

T : Temperatura del aire atmosférico [$^{\circ}K$].

3.3.8. Densidad (ρ).

La densidad del aire húmedo en función de la humedad absoluta y para una temperatura determinada se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$\rho = \frac{p_T}{0.4615 T} \frac{1+w}{0.622+w} \quad (3.7)$$

Dónde:

ρ : densidad del aire atmosférico [kg/m^3].

p_T : presión total del aire atmosférico [kPa].

w : Humedad absoluta del aire atmosférico [$kgva / kgas$].

T : Temperatura del aire atmosférico [$^{\circ}K$].

La densidad del aire se puede obtener mediante el inverso del volumen específico mencionado anteriormente.

3.3.9. Calor Específico (Cp).

“La temperatura del aire en aplicaciones de acondicionamiento de aire varía de -10 a cerca de 50 °C. En este intervalo, el aire seco puede tratarse como un gas ideal con un valor Cp constante de 1.005 (kJ/kg • K) [0.240 Btu/lbm • R] con un error insignificante (menor a 0.2 por ciento)” (Çengel & Boles, 2003, pág. 648.)

El calor específico es el calor que se requiere para aumentar 1°C de temperatura a una masa unitaria de aire y su vapor acompañante a presión constante. Para una mezcla de humedad absoluta w, tenemos.

$$C_p = 1.005 + 1.872 w \quad (3.8)$$

Dónde:

Cp: Calor específico [KJ /Kg_{as} °K].

w: Humedad absoluta del aire atmosférico [kgva / kgas].

3.3.10. Entalpía (h).

La entalpía del aire se expresa en términos de las entalpías del aire seco y del vapor de agua. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas, la cantidad de aire seco en la mezcla de aire-vapor de agua permanece constante, pero la cantidad de vapor de agua cambia. En consecuencia, la entalpía del aire atmosférico se expresa por unidad de masa del aire seco, y no por unidad de masa de la mezcla de aire-vapor de agua.

La entalpía total del aire atmosférico es la suma de las entalpías del aire seco y del vapor de agua.

$$h = h_{as} + w h_{va} \quad (3.9)$$

Dónde:

h : entalpía de la mezcla aire seco-vapor de agua en [KJ/Kgas].

h_{as} : Entalpia del aire seco [KJ/Kgas].

$$h_{as} = C_{p_{as}} T \quad (3.10)$$

h_{va} hg entalpia del agua en el límite del vapor saturado [KJ/Kgva].

$$h_{va} = 2500.9 + C_{p_{va}} T \quad (3.11)$$

T : Temperatura a la que se encuentra la mezcla [°C].

C_p : Calor específico de la sustancia a temperatura T [kJ/kg °C].

3.4. LA CARTA PSICROMÉTRICA.

El estado del aire atmosférico a una presión especificada se establece por completo mediante dos propiedades intensivas independientes. El resto de las propiedades se calculan fácilmente a partir de relaciones anteriormente descritas, software² o cartas³. Con objetivo de facilitar el cálculo de estas propiedades se desarrollan graficas donde se puede encontrar de manera más sencilla estos valores. Para el caso específico de las propiedades del aire atmosférico dichas gráficas reciben el nombre de cartas psicrométricas, y se utilizan en aplicaciones de acondicionamiento de aire.

La norma ASHRAE ha desarrollado varias cartas psicrométricas, las que se presentan para diferentes altitudes esto quiere decir que han sido desarrolladas a diferentes presiones atmosféricas, además se han calculado para diferentes intervalos de temperatura (normal, medio, alto y muy alto).

² Engineering Equation Solver. 1992-2006 S.A. Klein. Limited Academic Version 7.692D.

³ (ASHRAE, 2009, pág. 1.11)

3.4.1. Lectura Sobre la Carta Psicrométrica.

Las temperaturas de bulbo seco se muestran sobre el eje horizontal y la humedad específica sobre el eje vertical de la carta. En el extremo izquierdo de la carta se observa una curva (llamada línea de saturación) en lugar de una línea recta. Todos los estados de aire saturado se localizan en esta curva. Por lo tanto, es también la curva de un 100 por ciento de humedad relativa. Otras curvas de humedad relativa constante tienen por lo general la misma forma. Otras curvas de humedad relativa constante tienen por lo general la misma forma.

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante tienen una apariencia descendente hacia la derecha. Las líneas de volumen específico constante (en m^3/kg de aire seco) parecen similares, salvo que son más inclinadas. Las líneas de entalpía constante (en kJ/kg de aire seco) están casi paralelas a las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante. Por consiguiente, las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante en algunas cartas se emplean como líneas de entalpía constante.

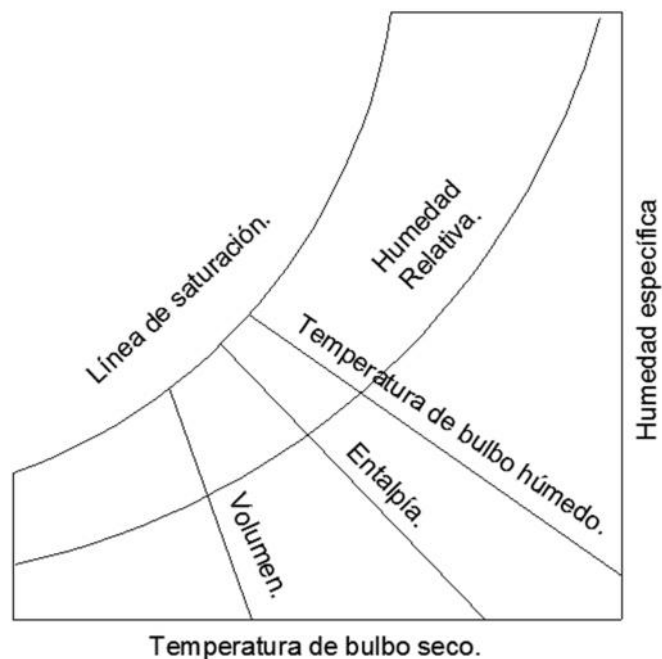


FIGURA 9. Esquema y descripción de la carta psicrométrica.

Para aire saturado, las temperaturas de bulbo seco, de bulbo húmedo y de punto de rocío son idénticas, por ende, la temperatura de punto de rocío del aire atmosférico en cualquier punto sobre la gráfica se determina al dibujar una línea horizontal (una línea de $x = \text{constante}$ o $pva = \text{constante}$) desde el punto hasta la curva saturada. El valor de la temperatura en el punto de intersección es la temperatura de punto de rocío.

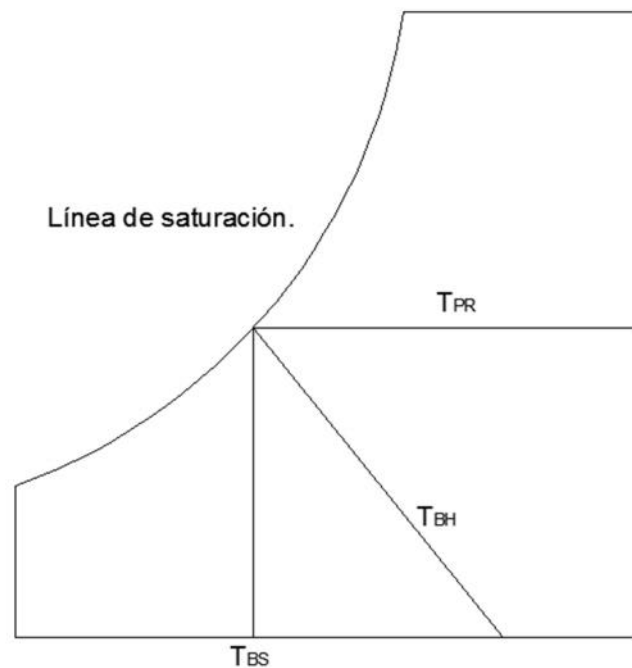


FIGURA 10. Para aire saturado, se cumple $T_{BS}=T_{BH}=T_{PR}$.

La carta psicrométrica también es una valiosa ayuda en la visualización de los procesos de acondicionamiento de aire. Un proceso de calentamiento o enfriamiento ordinario, por ejemplo, aparecerá como una línea horizontal en esta carta si no se incluye humidificación (es decir, $w=\text{cte}$). Cualquier desviación de la línea horizontal indica que durante el proceso se añade o se extrae humedad al o del aire.

3.5. PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE.

Son procesos que permiten el cambio de las condiciones del aire atmosférico, estos procesos incluyen el calentamiento simple (elevar la temperatura), el enfriamiento simple (reducir la temperatura), la humidificación (agregar humedad) y la deshumidificación (eliminar humedad). Algunas veces dos o más de estos procesos son necesarios para llevar el aire al nivel de temperatura y humedad que se desea.

Los procesos de calentamiento y enfriamiento simple aparecen como líneas horizontales en la gráfica, puesto que el contenido de humedad del aire permanece constante ($w = \text{constante}$) durante estos procesos.

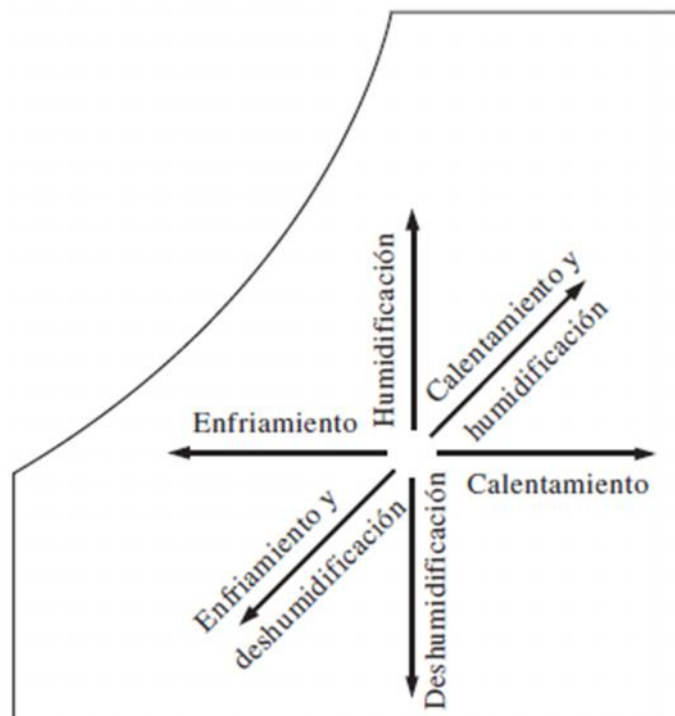


FIGURA 11. Representación en la carta psicrométrica de los distintos procesos de acondicionamiento de aire.

Fuente: (Çengel & Boles, 2003).

3.5.1. Balance de Masa en Sistemas de Acondicionamiento de Aire.

La mayor parte de los procesos del acondicionamiento de aire pueden modelarse como procesos de flujo estacionario, y por lo tanto, la relación de balance de masa se expresa para el aire como:

$$\Sigma M_E = \Sigma M_S$$

$$\Sigma M_{as} (1 + w)_E = \Sigma M_{as} (1 + w)_S \quad (3.12)$$

Dónde:

$M_{av}(1+w)$: La masa de la mezcla aire-vapor de agua [kg/s].

M_{as} : Masa de aire seco [kg/s].

w : Humedad absoluta del aire [kgva / kgas].

3.5.2. Balance de Energía en Sistemas de Acondicionamiento de Aire.

Despreciando los cambios de energía cinética y potencial, la relación del balance de energía de flujo puede expresarse en este caso como:

$$\Sigma E_E = \Sigma E_S$$

$$Q_E + W_E + \Sigma M_{as} h_E = Q_S + W_S + \Sigma M_{as} h_S \quad (3.13)$$

Dónde:

Q : Flujo de calor [kW].

W : Trabajo [kW].

M_{as} : Masa de aire seco [kg/s].

h : entalpía de la mezcla aire seco-vapor de agua en [KJ/Kgas].

El término “trabajo” por lo general consiste en el trabajo del ventilador, que es muy pequeño respecto de otros términos de la ecuación de la energía, por ende generalmente es despreciable.

3.5.3. Calentamiento y Enfriamiento Simple ($w = \text{constante}$).

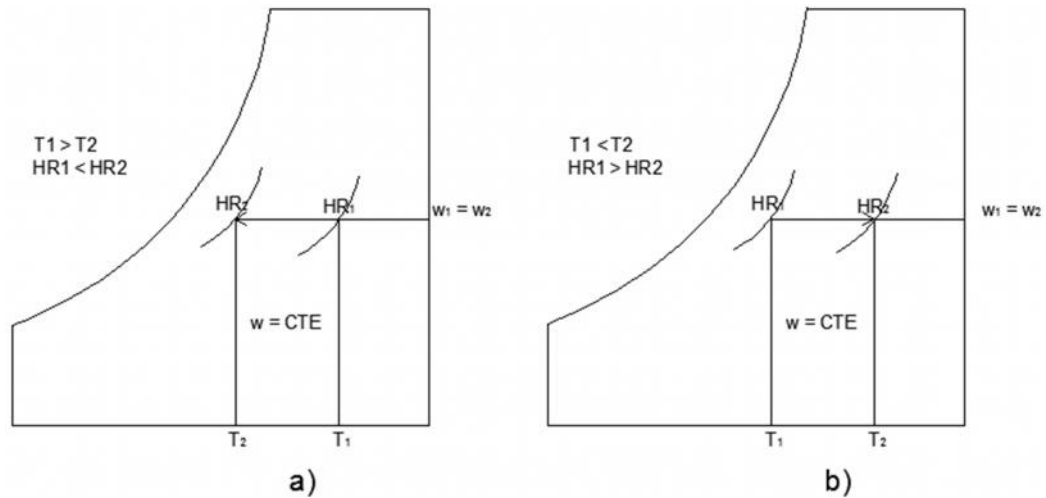


FIGURA 12. Acondicionamiento de aire con humedad absoluta constante.
a) Enfriamiento sensible, b) Calentamiento sensible.

La característica que define al proceso de calentamiento o enfriamiento simple es que la humedad específica del aire permanece constante ($w = \text{constante}$) durante un proceso de, esto quiere decir sin humidificación o deshumidificación.

Dicho proceso de calentamiento procederá en la dirección de aumento de la temperatura de bulbo seco o de forma contraria en el caso de enfriamiento siguiendo una línea de humedad específica constante en la carta psicrométrica, la cual se dibuja como una línea horizontal.

Es importante considerar que la humedad relativa del aire disminuye durante un proceso de calentamiento, incluso si la humedad específica permanece constante y viceversa en el caso de un proceso de enfriamiento.

La ecuación de la conservación de la masa para un proceso de calentamiento o enfriamiento que no incluye humidificación o deshumidificación se reducen a lo siguiente:

$$\begin{aligned}\Sigma M_E &= \Sigma M_S \\ M_{as}(1 + w_1) &= M_{as}(1 + w_2)\end{aligned}\quad (3.14)$$

Dónde:

M_{as} : Masa de aire seco [kg/s].

w : Humedad absoluta del aire [kgva / kgas].

Si se descarta cualquier trabajo de ventilador que pueda estar presente, La ecuación de la conservación de la energía para un proceso de calentamiento o enfriamiento que no incluye humidificación o deshumidificación se reducen a lo siguiente:

$$\begin{aligned}\Sigma E_E &= \Sigma E_S \\ q_{12} &= h_2 - h_1\end{aligned}\quad (3.15)$$

$$Q_{12} = M_{as} (h_2 - h_1) \quad (3.16)$$

Dónde:

q : Calor que gana o pierde para pasar del estado 1 al estado 2 [kJ/kg].

Q : Calor que gana o pierde para pasar del estado 1 al estado 2 [kW].

M_{as} : Masa de aire seco [kg/s].

h : Entalpia [kJ / kgas].

Los procesos de acondicionamiento de aire no solo se reducen al proceso de calentamiento y enfriamiento sensible, a estos se suma el proceso de humidificación, deshumidificación y mezclas de aires con diferentes características⁴. En este proyecto no se describirán estos procesos detalladamente. Sin embargo, la base para el desarrollo de estos procesos es el balance de masa y balance de energía que se describió en los apartados anteriores.

⁴ (Çengel & Boles, 2003, pág. 660)

3.6. INTRODUCCIÓN A LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

El calor que puede intercambiar un cuerpo con su entorno depende del tipo de interacción que exista entre ambos, por tanto dependerá del medio. Los cuerpos no poseen calor, sino poseen energía interna.

3.6.1. Calor Latente.

Es la cantidad de energía térmica empleada para el cambio de fase de una sustancia, considerando que este cambio se realiza de manera reversible a temperatura y presión constante.

La expresión para el cálculo del calor latente es la siguiente:

$$Q_L = M h \quad (3.17)$$

Dónde:

Q_L : Calor latente [kJ].

M : masa de la sustancia [kg].

h : entalpia de cambio de estado [kJ/kg].

3.6.2. Calor Sensible.

Se define como la cantidad de calor que recibe un cuerpo o un objeto y hace que este aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado. Se ha observado que la cantidad necesaria de calor para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo y la variación de temperatura.

La expresión para el cálculo del calor sensible cuando se considera una presión constante es la siguiente:

$$Q_S = M C_p \Delta T \quad (3.18)$$

Dónde:

Q_S : Calor Sensible [kJ].

M: masa de la sustancia [kg].

C_P : Calor específico a presión constante [kJ/kg °C].

ΔT : Variación de Temperatura [°C].

3.6.3. Calor y Temperatura.

- El calor es la energía total del movimiento molecular en una sustancia, mientras la temperatura es una medida de la cantidad de energía molecular media.
- El calor depende de la velocidad de las partículas, su cantidad, su tamaño y tipo, la temperatura no depende del tamaño, de la cantidad o del tipo.
- El calor es lo que hace que la temperatura aumente o disminuya. Si añadimos calor, la temperatura aumenta y viceversa, temperatura es sinónimo de movimiento y agitación de moléculas esto quiere decir que a mayor movimiento molecular mayor temperatura.
- La temperatura no es energía sin embargo permite cuantificarla, por otro lado el calor si es energía.

3.7. FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.

Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario (que puede ser un sólido o un fluido), utilizamos el término conducción para referirnos a la transferencia de calor que se producirá a través de ese medio.

En cambio, el termino convección se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas

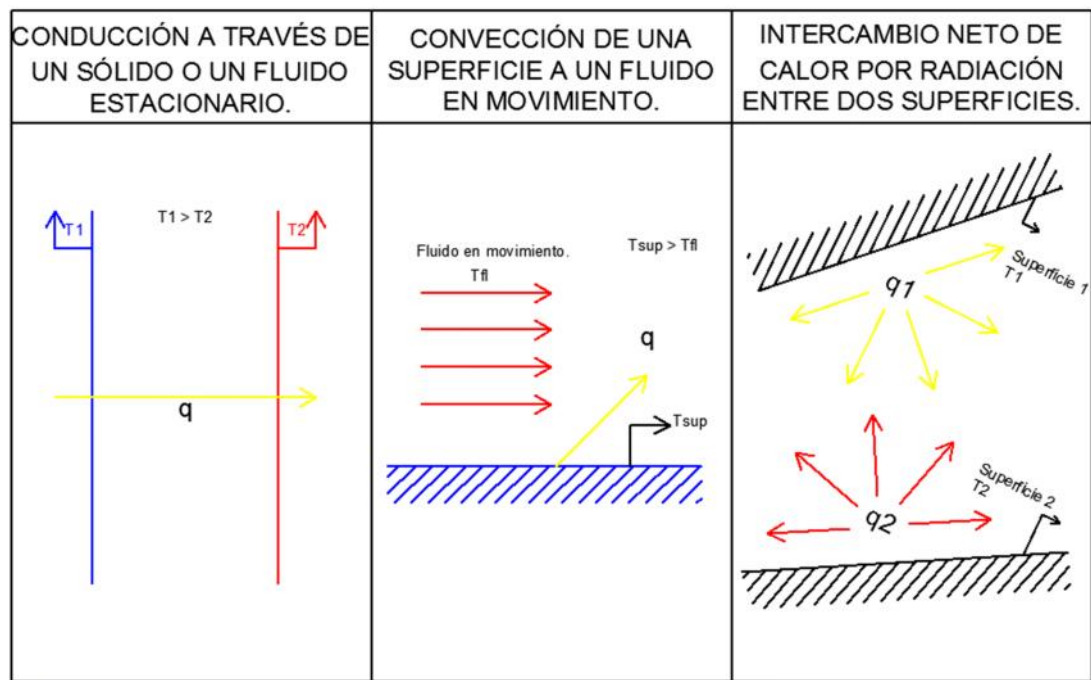


FIGURA 13. Modelos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999).

El tercer modo de transferencia de calor se denomina radiación térmica. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por tanto, en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones y modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo.

3.7.1. Conducción.

Conducción es sinónimo de actividad atómica y molecular, la conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas con más energía a las que tienen menos energía debido a las interacciones entre las mismas. La transferencia de energía por conducción ocurre en la dirección de la temperatura decreciente. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como **La ley de Fourier**. Para la pared plana unidimensional, la cual tiene una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación o modelo se expresa como:

$$q_x = k \frac{dT}{dx}$$

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área q_x [W/m^2] es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. La constante de proporcionalidad, k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica [$W/m^{\circ}K$] y es una característica del material de la pared. En las condiciones de estado estable donde la distribución de temperatura es lineal, el gradiente de temperatura se expresa como:

$$q_x = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3.19)$$

Dónde:

q_x : El flujo de calor de calor por unidad de área [W/m^2].

k : conductividad térmica [$W/m^{\circ}K$].

L : espesor de pared [m].

T : Variación de temperatura [$^{\circ}K$].

3.7.2. Convección.

La transferencia de calor por convección, ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando estos tienen diferentes temperaturas. El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. La transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión) y la energía transferida mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. La transferencia de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido.

Una consecuencia de la interacción fluido-superficie es el desarrollo de una región en el fluido en la que la velocidad varía de cero en la superficie a un valor finito u asociado con el flujo. Esta región del fluido se conoce como capa límite hidrodinámica o de velocidad.

Si las temperaturas de la superficie y del fluido difieren, habrá una región del fluido a través de la cual la temperatura varía. Esta región, denominada capa límite térmica, y puede ser más pequeña, más grande o del mismo tamaño que aquella en la que varía la velocidad. En cualquier caso si $T_{\text{sup}} > T_{\text{fl}}$ ocurrirá la transferencia de calor por convección entre la superficie y el flujo exterior.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Hablamos de convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos. En cambio, en la convección libre o natural el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido. Pueden existir

condiciones correspondientes a convección mezclada (combinada) forzada y convección natural.

La transferencia de calor por convección se describe como la transferencia de energía que ocurre dentro de un fluido debido a los efectos combinados de conducción y movimiento global del fluido. Por lo general, la energía que se transfiere es la energía sensible o energía térmica interna del fluido. Sin embargo, hay procesos de convección en los que existe, además, intercambio de calor latente. Este generalmente se asocia con un cambio de fase entre los estados líquido y vapor de fluido (ebullición y condensación).

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, el modelo de la transferencia de calor por convección sigue la **ley de enfriamiento de Newton**.

$$q = h T_{\text{sup}} - T_{\text{fl}} \quad (3.20)$$

Dónde:

q : flujo de calor por convección [W/m^2].

h : coeficiente de transferencia de calor por convección [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$].

T_{sup} : Temperatura de la superficie [$^\circ\text{K}$].

T_{fl} : Temperatura del fluido [$^\circ\text{K}$].

El coeficiente de convección es un parámetro que depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte. Cualquier estudio de convección se reduce finalmente a un estudio de los medios por los que es posible determinar h .

3.7.3. Radiación.

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. La radiación puede provenir de sólidos, líquidos y gases. Sin importar la forma de la materia, la materia se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos y o moléculas constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones) y ocurre de manera más eficiente en el vacío.

Un caso especial que ocurre con frecuencia implica el intercambio de radiación entre una superficie pequeña a T_{sup} y una superficie isotérmica mucho más grande que rodea por completo a la pequeña. Los alrededores podrían ser, por ejemplo, las paredes de un cuarto o un horno cuya temperatura T_{alr} es diferente de la de una superficie rodeada ($T_{sup} \neq T_{alr}$). Si se supone que la superficie es tal que $\epsilon = 1$ (superficie gris), la velocidad neta de transferencia de calor por radiación desde la superficie, expresada por unidad de área de la superficie, es:

$$q = \epsilon\sigma(T_{sup}^4 - T_{alr}^4) \quad (3.21)$$

Dónde:

- q : Calor por radiación directa de una superficie caliente [W / m^2].
- ϵ : Emisividad valor que se encuentra entre $0 < \epsilon < 1$.
- ρ : Absortividad valor que se encuentra entre $0 < \rho < 1$.
- σ : Constante de Stefan Boltzmann⁵ con valor de $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4]$.
- T_{alr} : Temperatura absoluta de los alrededores [$^{\circ}K$].
- T_{sup} : Temperatura absoluta de la superficie irradiante [$^{\circ}K$].

⁵ Para q_R en [$BTU/h ft^2$], T en [$^{\circ}R$], h_R en [$BTU/h ft^2 ^{\circ}F$] y $\sigma = 1.730 \times 10^{-9} [BTU/h ft^2 ^{\circ}F^4]$.

Esta expresión proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción de radiación. Hay muchas aplicaciones para las que es conveniente expresar el intercambio neto de calor por radiación en la forma:

$$q = h_R T_{\text{sup}} - T_{\text{alr}} \quad (3.22)$$

$$h_R = \varepsilon \sigma T_{\text{alr}} + T_{\text{sup}} (T_{\text{alr}}^2 + T_{\text{sup}}^2) \quad (3.23)$$

Dónde:

q : Calor por radiación directa de una superficie caliente [W / m^2].

h_R : coeficiente de transferencia de calor por radiación [$W/m^2 K$].

ε : Emisividad $0 < \varepsilon < 1$.

σ : Absortividad $0 < \sigma < 1$.

T_{alr} : Temperatura absoluta de los alrededores [$^{\circ}K$].

T_{sup} : Temperatura absoluta de la superficie irradiante [$^{\circ}K$].

3.8. RESISTENCIA TÉRMICA EN LA PARED COMPUESTA.

Los circuitos térmicos son importantes para la resolución de sistemas complejos, como el caso de las paredes compuestas. Estas paredes incluyen cualquier número de resistencias térmicas en serie y en paralelo debido a capas de diferentes materiales y condiciones externas del medio que lo rodea.

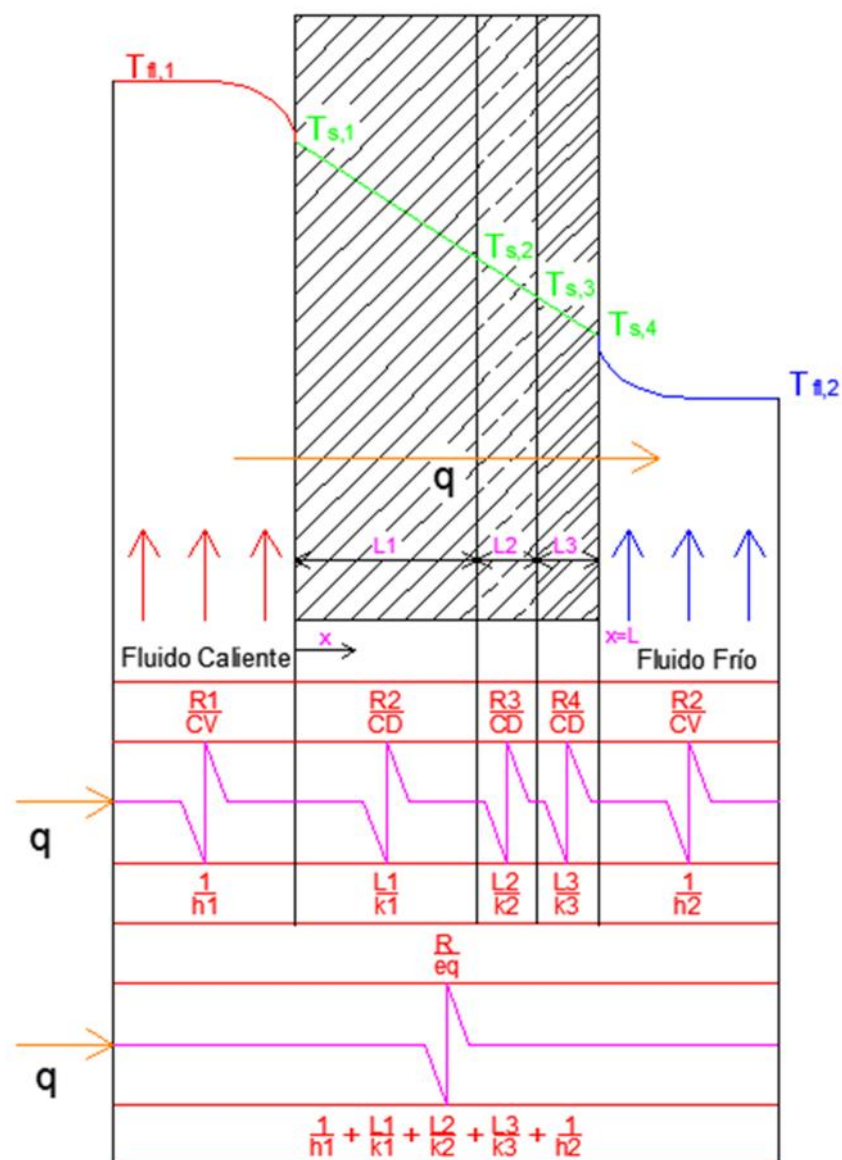


FIGURA 14. Transferencia de calor en la pared compuesta. Incluye analogía de la resistencia eléctrica entre la transferencia de calor por conducción y transferencia de calor por convección en caras laterales.

3.8.1. Resistencia Térmica en Conducción.

En particular, existe una analogía entre la difusión de calor y la carga eléctrica. De la misma manera que se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de electricidad, se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de calor. Al definir la resistencia como la razón de un potencial de transmisión a la transferencia de calor, se tiene que la resistencia térmica para la conducción a partir de la ley de Fourier es:

$$R_{CD} \equiv \frac{T_1 - T_2}{\frac{q_x}{A}} = \frac{L}{k} \quad (3.24)$$

Dónde:

R_{CD} : Es la resistencia térmica para la conducción [$^{\circ}K/W$]

q_x : El flujo o transferencia de calor por unidad de área [W/m^2].

A: área de pared plana perpendicular al sentido del flujo de calor [m^2].

k: conductividad térmica [$W/m^{\circ}K$].

L: espesor de pared [m].

$T_1 - T_2$: Variación de temperatura [$^{\circ}K$].

3.8.2. Resistencia térmica en Convección.

Una resistencia térmica también se asocia con la transferencia de calor mediante convección a una superficie. La resistencia térmica para la convección a partir de la ley de enfriamiento de Newton es:

$$R_{CV} \equiv \frac{T_{sup} - T_{fl}}{\frac{q}{A}} = \frac{1}{h} \quad (3.25)$$

Dónde:

R_{CV} : Es la resistencia térmica para la convección [$^{\circ}K/W$]

q: flujo de calor por convección [W/m^2].

h: coeficiente de transferencia de calor por convección [$W/m^2 \text{ } ^{\circ}K$].

A: área de pared plana perpendicular al sentido del flujo de calor [m²].

T_{sup}: Temperatura de la superficie [°K].

T_{fl}: Temperatura del fluido [°K].

3.8.3. Resistencia Térmica en Radiación.

El intercambio de radiación entre la superficie y sus alrededores puede ser importante y en aplicaciones donde amerite ser minuciosos debe considerarse. La resistencia térmica para la radiación se define como:

$$R_R \equiv \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{alr}}}{\frac{q}{A}} = \frac{1}{h_R} \quad (3.26)$$

Dónde:

R_R: Es la resistencia térmica para la radiación [°K/W].

h_R: coeficiente de transferencia de calor por radiación [W/m² K]

T_{alr}: Temperatura absoluta de los alrededores [°K].

T_{sup}: Temperatura absoluta de la superficie irradiante [°K].

A: área de pared plana perpendicular al sentido del flujo de calor [m²].

3.8.4. Resistencia Equivalente en Pared Compuesta

Las representaciones de circuitos proporcionan una herramienta útil para conceptualizar y cuantificar problemas de transferencia de calor. La transferencia de calor se determina mediante la consideración por separado de cada elemento en el enmallado. Tomando en consideración que para el sistema de transferencia de calor unidimensional de estado estable en una pared plana sin generación interna de calor, el flujo de calor es una constante, independiente de x, se tiene lo siguiente:

$$q = \frac{T_{\text{fl},1} - T_{\text{sup},1}}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{T_{\text{sup},1} - T_{\text{sup},2}}{\frac{L_1}{k_1 A}} = \frac{T_{\text{sup},2} - T_{\text{sup},3}}{\frac{L_2}{k_2 A}} = \frac{T_{\text{sup},3} - T_{\text{sup},4}}{\frac{L_3}{k_3 A}} = \frac{T_{\text{sup},4} - T_{\text{fl},2}}{\frac{1}{h_2 A}}$$

En términos de la diferencia total de temperatura, $T_{f1,1} - T_{f1,2}$ y la Resistencia térmica total, R_T , la transferencia de calor también se expresa como:

$$q = \frac{T_{f1,1} - T_{f1,2}}{R_T}$$

Como las resistencias de conducción y convección están en serie y pueden sumarse, teniendo lo siguiente:

$$R_{eq} = \frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{1}{h_2} \quad (3.27)$$

Dónde:

R_{eq} : Resistencia equivalente [$^{\circ}\text{K m}^2/\text{W}$].

h : coeficiente de transferencia de calor por convección [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}$].

k : conductividad térmica [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$].

L : espesor de pared [m].

3.8.5. Coeficiente global de transferencia de calor.

El coeficiente global de transferencia de calor se calcula a partir de la resistencia equivalente del sistema que se esté estudiando mediante la siguiente relación:

$$U = \frac{1}{R_{eq}} \quad (3.28)$$

Dónde:

U : Coeficiente global de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}$].

R_{eq} : Resistencia equivalente [$^{\circ}\text{K m}^2/\text{W}$].

3.8.6. Cálculo del Flujo de Calor del Sistema.

Para un sistema en el cual se ha calculado el valor del coeficiente global de transferencia de calor el valor de la cantidad de calor que está fluyendo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$q = U A \Delta T \quad (3.29)$$

Dónde:

q: flujo de calor unidireccional [W/m^2].

A: Area de la sección transversal normal al flujo de calor [m^2].

U: coeficiente global de calor [$W/m^2 \text{ } ^\circ K$].

ΔT : Variación de la temperatura en el sistema [$^\circ K$].

CAPÍTULO 4.

EL SECADO.

4.1. HÚMEDAD EN LOS PRODUCTOS A SECAR.

La humedad contenida en los cuerpos sólidos o líquidos se presenta en formas de líquido puro (agua en la mayoría de los casos) o en forma de una solución en la que el agua constituye por lo general el disolvente. Según la naturaleza de la unión entre la humedad y la materia seca, se distinguen el líquido adherente, el líquido capilar y el líquido de hinchado.

4.2. EL LÍQUIDO ADHERENTE.

El líquido adherente se presenta en forma de una película unida a los fragmentos gruesos de la superficie exterior de la materia, existiendo por todas partes un contacto libre entre la superficie húmeda y el agente secador. El detalle característico del secado será que la presión de vapor del líquido adherente corresponderá para cada temperatura a su valor de saturación.

4.3. LÍQUIDO CAPILAR.

Se designa como líquido capilar el que queda retenido por los intersticios de una materia porosa y que, en el momento del secado, se desplaza hacia la superficie bajo la acción de fuerzas capilares.

4.3.1. Materiales de poros gruesos.

En las materias de poros gruesos, el líquido capilar, como el líquido adherente, conserva una tensión de vapor en relación a la temperatura del producto (Comportamiento no higroscópico).

4.3.2. Materiales de poros finos.

En las materias de poros finos, el diámetro capilar es muy reducido (menor a 10^{-7} m); la presión de vapor desciende aún más en el transcurso del secado, porque el líquido queda retenido en los capilares más finos (Comportamiento higroscópico).

4.4. LÍQUIDO HINCHADO

Como líquido hinchado entendemos toda clase de humedad que provoca en un cuerpo un hinchamiento o aumento de volumen. La unión es por lo general de naturaleza coloidal. Mientras que el líquido adherente y el líquido capilar mojan las superficies externa e interna del producto, el líquido hinchado forma parte integral de la fase del producto.

4.5. CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS PRODUCTOS A SECAR.

A continuación se resumirá ciertos términos que se utilizan para describir el contenido de humedad de las sustancias:

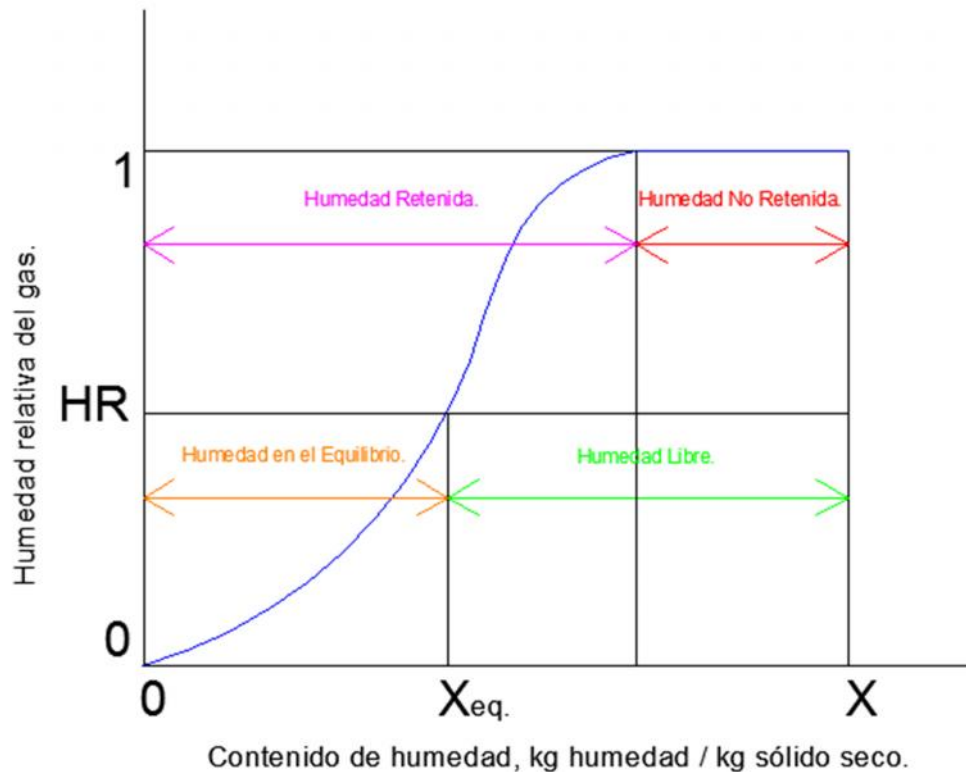


FIGURA 15. Tipos de humedad de una sustancia en contacto con un gas.

Fuente: (Treybal, 1988).

4.6. CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (X_{BH}).

El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se sobreentiende que esta expresado en base húmeda, es decir:

$$X_{BH} = \frac{M_H}{M_T} = \frac{M_H}{M_H + M_S} \quad (4.1)$$

Dónde:

X_{BH} : Contenido de humedad en base húmeda [adimensional]

M_H : Cantidad de humedad (agua) [kg].

M_S : Cantidad de sustancia seca [kg].

M_T : Masa total del producto ($M_H + M_S$) [kg].

4.7. CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA (X_{BS}).

Se expresa como:

$$X_{BS} = \frac{X_{BH}}{1-X_{BH}} \quad (4.2)$$

Dónde:

X_{BH} : Contenido de humedad en base húmeda [adimensional].

X_{BS} : Contenido de humedad en base seca [adimensional].

4.8. HUMEDAD EN EL EQUILIBRIO (X_{EQ}).

Es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con la presión parcial dada del vapor. Sus valores⁶ se encuentran tabulados para ciertos productos y depende de las características mismas del producto y de las características del gas secante.

4.9. CANTIDAD DE AGUA REMOVIDA.

Como se ha mencionado anteriormente los productos a secar tienen una cantidad de humedad antes de someterse al proceso de secado y deberán tener otra al final del proceso, la cual depende de las especificaciones o exigencias en el proceso, una herramienta importante para el diseño de los sistemas de secado es conocer la cantidad de agua que se va a eliminar. La cantidad de agua que se elimina durante el proceso según los conceptos anteriormente descritos se puede calcular con la siguiente expresión.

$$\Delta M_{ag} = M_S \left(\frac{X_{iBH}}{1-X_{iBH}} - \frac{X_{fBH}}{1-X_{fBH}} \right) \quad (4.3)$$

⁶ (Perry, 1994, págs. 12-63)

Dónde:

ΔM_{ag} : cantidad de agua eliminada en el secado [kg].

M_s : cantidad de sustancia seca [kg].

X_{iBH} : contenido de humedad (fracción en peso) antes del secado [adimensional].

X_{fBH} : contenido de humedad (fracción en peso) a la que debe llegar después del secado [adimensional].

4.10. EL FENÓMENO DE SECADO.

En general, el secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material. La evaporación se refiere a la eliminación de cantidades de agua bastante grandes; además, el agua ahí se elimina en forma de vapor a su punto de ebullición. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire.

En algunos casos, el agua se puede eliminar de los materiales sólidos por medios mecánicos, utilizando prensas, centrifugas y otros métodos. Esto resulta más económico que el secado por medio térmicos para la eliminación de agua, el contenido de humedad del producto seco final varía, ya que depende del tipo de producto. El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que muchos materiales sean más adecuados para su manejo.

Este apartado limitara principalmente a la eliminación de humedad de sólidos por evaporación en una corriente gaseosa, en la práctica, la humedad es con frecuencia agua y el gas con frecuencia es aire cuyo sistema proporcionara las bases para el desarrollo de los análisis posteriores. Sin embargo, es importante acentuar que el equipo, técnicas y relaciones son igualmente aplicables a otros sistemas.

4.11. TIPOS DE LECHO.

En el equipo la disposición entre el gas y el sólido, los sólidos pueden estar en cualquiera de las cuatro condiciones siguientes:

4.11.1. Estático.

Este es un lecho denso de sólidos en el cual cada partícula descansa una sobre la otra, debido a la densidad de la masa de la fase sólida. No existe movimiento relativo entre las partículas sólidas.

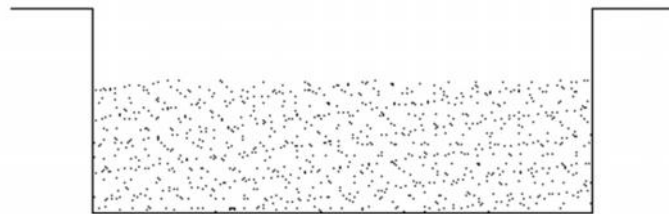


FIGURA 16. Lecho Estático (Secador de Bandejas).

Fuente: (Perry, 1994).

4.11.2. Móvil.

Este es un lecho de sólido ligeramente restringido en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse unas sobre otras. Por lo común, el flujo es descendente por acción de la fuerza de gravedad; pero también se puede registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación, generadas dentro del equipo de proceso. En algunos casos, la elevación de sólidos se lleva a cabo en equipos independientes y estos fluyen en presencia de la fase gaseosa solo en sentido descendente. Este último caso es un lecho móvil que generalmente se define dentro de la industria del petróleo y, según esta definición, el movimiento de los sólidos se logra por agitación mecánica o por la fuerza de gravedad.

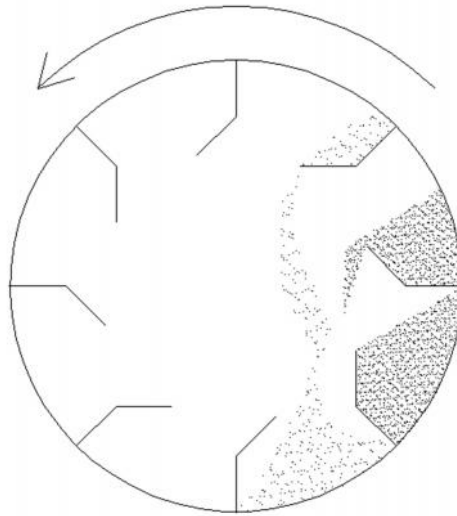


FIGURA 17. Lecho móvil de un Secador rotatorio.

Fuente: (Perry, 1994).

4.11.3. Fluidizado.

Se trata de una condición menos restringida, en el cual las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con una velocidad crítica dada. Es una condición inestable, porque la velocidad superficial ascendente del gas es menor que la velocidad final de asentamiento o sedimentación de las partículas sólidas; la velocidad del gas no basta para arrastrar y transportar en forma continua todos los sólidos. Al mismo tiempo, dentro de la corriente de gas se registran turbulencias con velocidades bastantes grandes para elevar transitoriamente las partículas. El movimiento de estas es repetidamente ascendente y descendente. En realidad, la fase sólida y la fase gaseosa están entremezcladas y se comportan juntas como un fluido en ebullición.

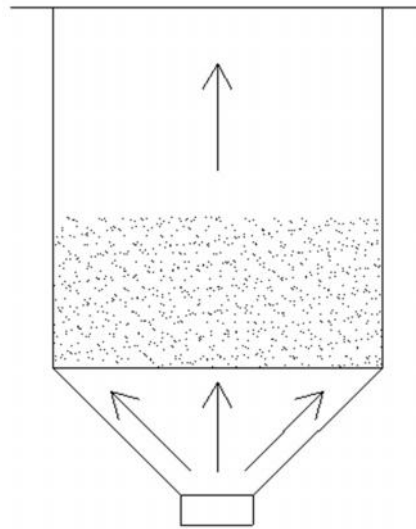


FIGURA 18. Lecho Fluidizado

Fuente: (Perry, 1994).

4.11.4. Diluido.

Esta es una condición de expansión total en la cual las partículas sólidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas sobre otras. A decir verdad, la fase sólida está tan dispersa dentro del gas que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa individual. Por lo común, esta situación se presenta cuando la velocidad del gas en todos los puntos del sistema sobrepasa la velocidad final de asentamiento de los sólidos, y las partículas ascienden y son arrastradas continuamente por el gas; sin embargo, no siempre será este el caso. Las cámaras de sedimentación por gravedad como las torres de granulación y los secadores por aspersion con flujo a contracorriente, son dos excepciones en el que la velocidad del gas es insuficiente para arrastrar por completo a los sólidos.

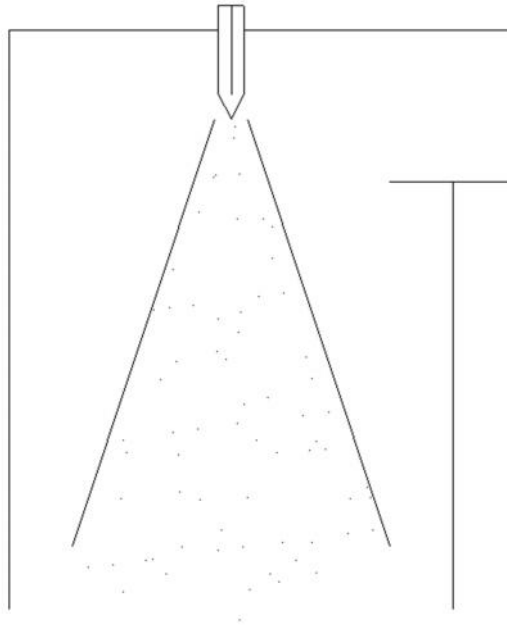


FIGURA 19. Sólido en condición diluida.

Fuente: (Perry, 1994).

4.12. CONTACTO FLUIDO Y PRODUCTO A SECAR.

Existen varias disposiciones para describir el método por el cual el gas entra en contacto con el lecho de sólidos, las más comunes se describen a continuación:

4.12.1. Flujo Paralelo.

La dirección del flujo de gas es paralela a la superficie de la fase sólida. El contacto tiene lugar primordialmente entre la cara comprendida entre dos fases, en donde se produce, quizás, una leve penetración del gas en los vacíos comprendidos entre los sólidos cercanos a la superficie. El lecho de sólidos se encuentra generalmente en condición estática.

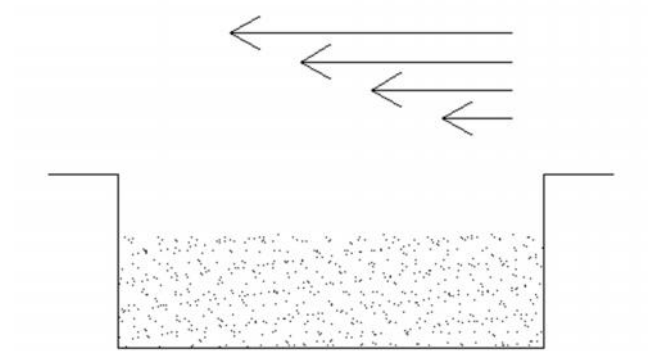


FIGURA 20. Flujo paralelo de gas sobre un lecho estático.

Fuente: (Perry, 1994).

4.12.2. Flujo de Gas Equicorriente.

La fase gaseosa y las partículas sólidas se desplazan en la misma dirección.

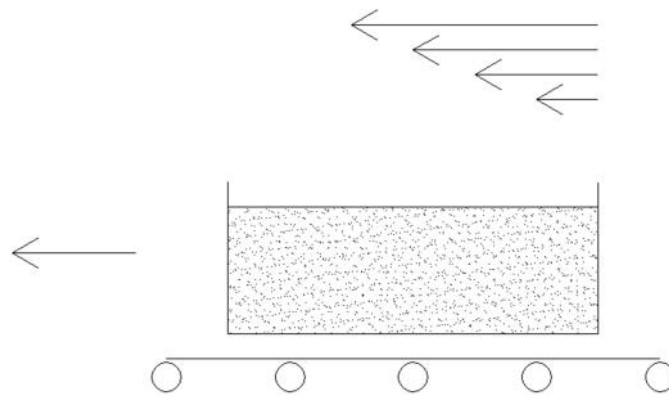


FIGURA 21. Flujo paralelo de gas sobre un lecho móvil ambos en la misma dirección y sentido.

Fuente: (Perry, 1994).

4.12.3. Flujo de Gas Contracorriente.

La dirección del flujo del gas es exactamente opuesta a la que sigue el movimiento de los sólidos.

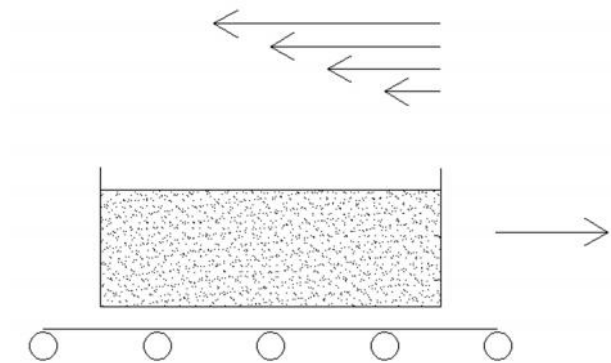


FIGURA 22. Flujo de gas y producto paralelos, en la misma dirección pero en sentido contrario de movimiento.

Fuente: (Perry, 1994).

4.12.4. Flujo Perpendicular.

La dirección de la corriente de gas es normal en la entrecara de las fases. El gas choca contra el lecho de sólidos, encontrándose también en este caso dicho lecho de manera estática.

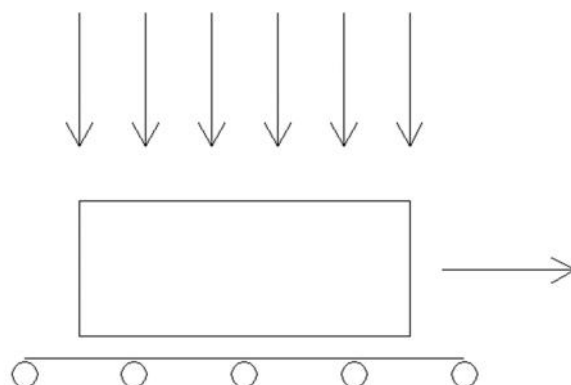


FIGURA 23. Flujo de gas y producto paralelos, en la misma dirección pero en sentido contrario de movimiento.

Fuente: (Perry, 1994).

4.12.5. Circulación Directa.

El gas penetra y fluye directamente pasando a través de los intersticios de los sólidos circulando de una manera más o menos libre en torno a las partículas individuales. Esto ocurre cuando los sólidos están en condición estática, móvil, fluidizada o diluida.

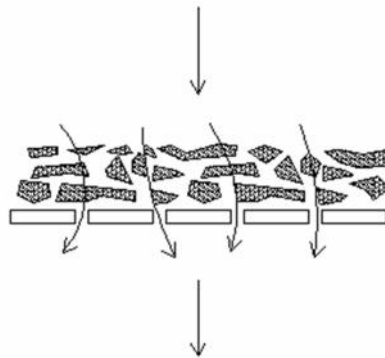


FIGURA 24. Circulación de gas en un flujo directo a través de sólidos perforados, sobre un transportador de plataforma.

Fuente: (Perry, 1994).

4.12.6. Flujo Transversal del Gas.

La dirección de la corriente del gas se realiza según ángulos rectos en relación con el movimiento de los sólidos, a través del lecho de sólidos.

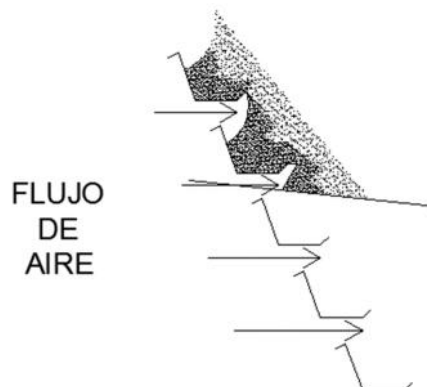


FIGURA 25. Flujo transversal de gas y sólidos en un secador por gravedad tipo cascada.

Fuente: (Perry, 1994).

4.13. CONSIDERACIONES ENTRE EL CONTACTO DEL FLUIDO Y EL PRODUCTO A SECAR.

Puesto que en una operación de contacto entre gases y sólidos la transferencia de calor y masa se desarrolla en las superficies de estos últimos, se puede esperar una máxima eficacia de proceso con una máxima exposición de la superficie de los sólidos a la fase gaseosa, junto con un mezclado minucioso de gas sólido. Estos dos aspectos son de primordial importancia. En cualquier disposición de sólidos en forma de macropartículas, el gas está presente en los vacíos generados entre partículas y entra en contacto con todas las superficies, excepto en los puntos en que las partículas se tocan entre sí. No obstante cuando el lecho de sólidos se encuentra en una condición estática o de movimiento muy leve, el gas que se introduce en los vacíos queda separado del cuerpo principal de la fase gaseosa. Es posible que se registre cierta transferencia de energía y masa por difusión, pero por lo general es insignificante. El diseño y la selección del equipo están regidos por dos factores:

- Las consideraciones mecánicas.- comprende en general la temperatura o el aislamiento del proceso.
- El flujo de sólidos y las características de la superficie.- son importantes en el sentido de que controlan el grado en el que una operación tiene restricciones de difusión.

4.14. CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES.

Existen varias maneras de clasificar los equipos de secado. Las dos más útiles se basan

- Método de transferencia de calor a los sólidos húmedos.

- Características de manejo y las propiedades físicas del material húmedo.

El primero método de clasificación revela las diferencias en el diseño y el funcionamiento del secador, mientras que el segundo es más útil para seleccionar entre un grupo de secadores que se someten a una consideración preliminar en relación con un problema de secado específico.

La clasificación descrita a continuación organiza a los equipos de secado basados en tipo de transferencia de calor que utilizan para su funcionamiento, y en base a este criterio los secadores se clasifican a su vez como directos o indirectos, estipulando subclases de operación continua o discontinua.

4.14.1. Secadores Directos.

Las características generales de operación de los secadores directos son:

- El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar estos últimos.
- Las temperaturas de secado varían hasta 1000°K , que es la temperatura limitante para casi todos los metales estructurales de uso común. A mayores temperaturas, la radiación se convierte en un mecanismo de transferencia de calor de suma importancia.
- A temperaturas de gases inferiores al punto de ebullición, el contenido de vapor de un gas influye en la velocidad del secado y el contenido de humedad del sólido. Con temperaturas de gas superiores al punto de ebullición en todos los puntos, el contenido de vapor del gas ejerce solo un ligero efecto de retraso en la velocidad del secado y el contenido final de humedad. Por lo tanto, los vapores super

calentados del líquido que se está separando pueden servir para secar.

- Para secados a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, quizá sea necesario deshumidificar el aire de secado.
- Un secador directo consume más combustible por libra agua evaporada cuanto más bajo sea el contenido final de humedad.
- La eficacia mejora al aumentar la temperatura del gas de entrada, para una temperatura de salida constante.
- Debido a las grandes cantidades de gas que se necesitan para proporcionar todo el calor de secado, el equipo de recuperación del polvo puede ser muy grande y costoso cuando se trata de secar partículas muy pequeñas.

4.14.2. Secadores Indirectos.

Difieren de los directos en la transmisión de calor y la separación del vapor, sus características generales de operación se enumeran a continuación.

- El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre metálica.
- Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación en el caso de secadores de congelación, hasta mayores de 800°K en el caso de secadores indirectos por medio de productos de combustión.
- Los secadores indirectos son apropiados para secar a presiones reducidas y en atmosferas inertes, para poder recuperar los disolventes y evitar la formación de mezclas explosivas o la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.

- Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medios de calentamiento son en general económicos, desde el punto de vista del consumo de calor, ya que suministran calor solo de acuerdo con la demanda hecha por el material que se está secando.
- La recuperación de polvos y materiales finamente pulverizados se maneja de una manera más satisfactoria en los secadores indirectos que en los directos.

4.14.3. Secadores Diversos.

Los secadores infrarrojos dependen de la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad. La energía radiante se suministra eléctricamente por medio de lámparas infrarrojas, resistencias eléctricas o refractarios incandescentes calentados por gas. Este último método ofrece la ventaja adicional del calentamiento por convección. El calentamiento infrarrojo no se utiliza comúnmente en la industria química para eliminar humedad, siendo su principal aplicación el horneado y secado de capas de pintura y en el calentamiento de capas finas de materiales.

4.14.4. Secadores Dieléctricos.

No han encontrado hasta ahora un campo muy alto de aplicación. Su característica fundamental de generación de calor dentro de los sólidos revela su potencial para secar objetos geométricos sólidos, como madera, diferentes formas de hule-espuma y cerámicos. Los costes de energía aumenta hasta diez veces el costo de combustible por métodos tradicionales.

4.15. VELOCIDAD DE SECADO POR LOTES.

Con el fin de fijar horarios de secado y determinar el tamaño del equipo, es necesario saber el tiempo que se requerirá para secar una sustancia a partir de un contenido de humedad a otro en condiciones específicas. También se desea calcular el efecto que tendrán las diferentes condiciones de secado en el tiempo de secado.

El conocimiento del mecanismo de secado es tan incompleto que, salvo pocas excepciones, es necesario confiar al menos en algunas mediciones experimentales. Las mediciones de la rapidez del secado por lotes son relativamente fáciles y proporcionan mucha información no solo para la operación por lotes sino también para la operación continua.

4.16. PRUEBAS DE SECADO.

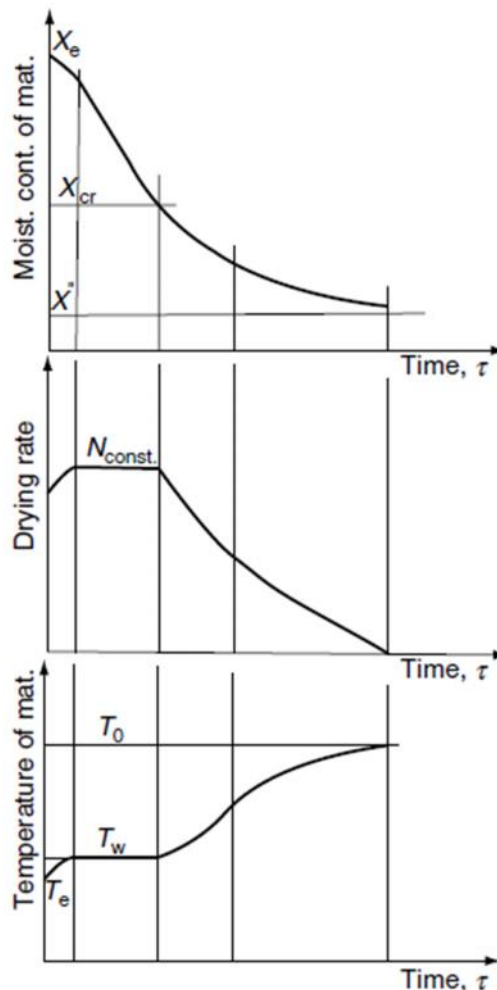
Con respecto a la muestra de una sustancia, la rapidez de secado puede determinarse suspendiendo la muestra en un gabinete o tubería, por la cual fluye una corriente de aire, para después realizar un balance. Entonces, el peso de la muestra secada puede medirse como una función del tiempo. Deben tomarse en cuenta ciertas precauciones para que los datos sean de máxima utilidad. La muestra no debe ser muy pequeña y más aún, las condiciones deben parecerse lo más posible a las condiciones que se prevé, predominaran en la operación a gran escala. La descripción del proceso de enumera a continuación.

- La muestra debe colocarse en una disposición similar sobre un plato o estructura.
- Debe tener la misma relación de superficie que se seca a la que no se seca,
- Debe sujetarse a condiciones similares de calor por radiación.

- El aire debe tener la misma temperatura, humedad y velocidad (con la misma velocidad y dirección con respecto a la muestra).
- De ser posible, se deben realizar varias pruebas sobre muestras de diferente espesor y por último debe obtenerse el peso en seco de la muestra.

La exposición de la muestra a aire de temperatura, humedad y velocidad constante constituye el secado en condiciones constantes de secado.

4.17. CURVA DE RAPIDEZ DE SECADO.



GRÁFICA 2. Gráficas de secado por lotes a condiciones constantes.

Fuente: (Mujundar, 2006).

A partir de los datos obtenidos durante pruebas de secado, se puede obtener una curva de contenido de humedad como función del tiempo, la cual muestra el porcentaje de humedad en base seca vs tiempo de secado a ciertas condiciones de temperatura.

Al diferenciar esta curva se obtiene una imagen rica en datos la misma que muestra la modificación de la humedad del producto en función del tiempo. Esta variación referida a la unidad de superficie se llama rapidez de secado. Por último se puede obtener la gráfica que indica la variación de la humedad temporal en función del contenido de humedad del producto.

La curva de la gráfica contenido de humedad de producto vs tiempo será útil para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes en las mismas condiciones de secado. Se puede obtener mucha información si los datos se convierten a rapidezces (fluxes) de secado, expresada como N [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$] y se grafica contra el contenido de humedad. Esto puede hacerse midiendo las pendientes de las tangentes trazadas a la curva de contenido de humedad de producto vs tiempo de secado o determinando, a partir de la curva, pequeños cambios en el contenido de humedad X para los cambios pequeños correspondientes en el tiempo t y calculando la rapidez como:

$$N = - M_S \frac{\Delta X}{A \Delta t} \quad (4.4)$$

Dónde:

N : velocidad de secado [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$].

M_S : masa sólido seco [kg].

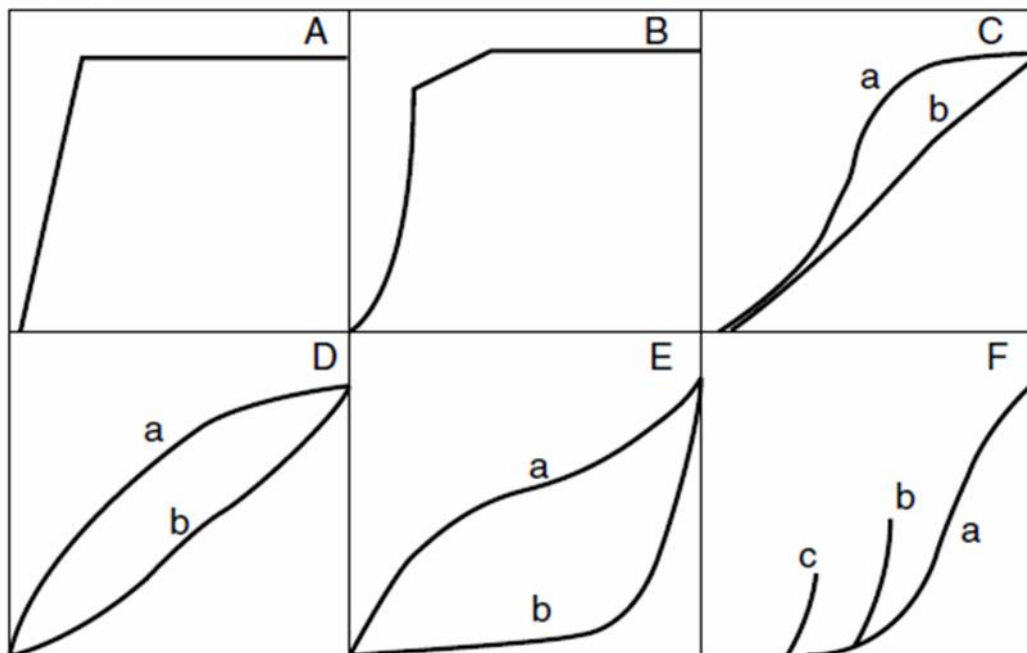
A : superficie húmeda sobre la cual sopla el gas [m^2].

X : contenido de humedad [$\text{kg}_H/\text{kg}_{SS}$].

t : tiempo de secado [s].

Generalmente hay dos partes principales en la curva de rapidez de secado de un producto; un periodo de rapidez constante y uno de rapidez decreciente. A menudo sólidos diferentes y condiciones distintas de secado dan lugar a curvas de formas muy diferentes en el periodo decreciente de la rapidez.

Drying of solids



GRÁFICA 3. Curvas normalizadas de rapidez de secado de diferentes tipos de materiales.

A) arena, arcilla, gel de sílice, pasta de papel, cuero, B) arena, mezcla de plástico y arcilla, mezcla de sílice de ladrillo, placa de cerámica, cuero, C) [a] madera de abeto, [b] madera de Ciprés D) [a] papel y lana, [b] patatas, tubérculo de tapioca, harina de arroz, E) [a] pan de centeno y levadura, [b] mantequilla y margarina F) [a] granos de trigo, [b] y [c] representan curvas a valores más bajos de humedad inicial.

Fuente: (Mujundar, 2006).

Si un sólido se encuentra inicialmente muy húmedo, la superficie estará cubierta con una delgada película de líquido, que se supondrá como humedad total no ligada. Cuando se expone a aire relativamente seco, la evaporación tendrá lugar desde la superficie. La rapidez a la cual se evapora

la humedad puede escribirse en función K_Y , coeficiente de transferencia de masa del gas y de la diferencia de humedad entre el gas en la superficie líquida w_{sup} y en la corriente principal w_G . Entonces para el secado por circulación tangencial:

$$N_c = K_Y w_{sup} - w_G \quad (4.5)$$

Dónde:

N_c : Rapidez de evaporación secado a velocidad constante [$\text{kg}_{ev}/\text{m}^2 \text{ s}$].

K_Y : coeficiente de transferencia de masa del gas y de la diferencia de humedad entre el gas en la superficie líquida [kg].

w_{sup} : contenido de humedad de la superficie líquida [kg_H/kg_L].

w_G : contenido de humedad del gas [kg_H/kg_G].

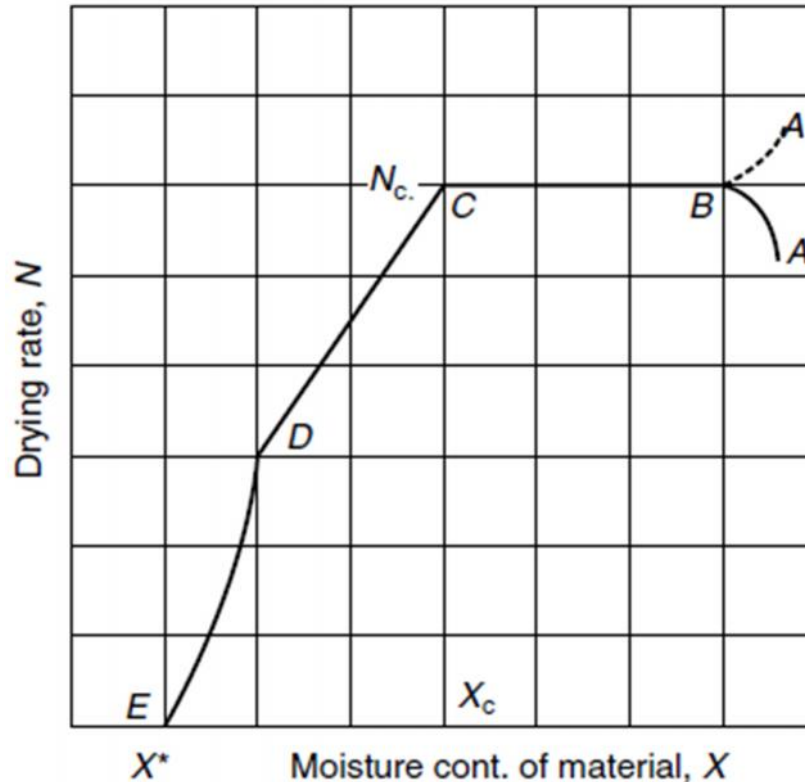
Se puede prever que el coeficiente K_Y permanecerá constante siempre y cuando no cambie la dirección y velocidad del flujo de gas sobre la superficie. La humedad w_{sup} es la humedad de saturación en la temperatura superficial T_{sup} , por lo tanto, dependerá de esta temperatura. Puesto que la evaporación de humedad absorbe calor latente, la superficie líquida llega y permanece en una temperatura en el equilibrio tal que la rapidez del flujo de calor en el entorno de la superficie es exactamente igual a la rapidez de absorción de calor. Por lo tanto, w_{sup} permanece constante. Los capilares e intersticios del sólido, llenos de líquido, pueden llevar líquido hasta la superficie tan rápidamente como el líquido se evapora en esta. Puesto que además w_G permanece constante en las condiciones constantes de secado, la rapidez de evaporación debe permanecer constante en el valor de N_c . Al principio, la superficie sólida y la líquida están generalmente más frías que la temperatura superficial final T_{sup} ; la rapidez de evaporación aumenta cuando la temperatura superficial aumenta hasta su valor final. En forma, alternativa, la temperatura en el equilibrio T_{eq} puede ser menor que el valor inicial, lo cual dará lugar a una curva alterna mientras ocurre el ajuste inicial.

Generalmente el periodo inicial es tan corto que por lo general se ignora en el análisis de los tiempos de secado.

Cuando el contenido de humedad promedio del sólido alcanza un valor X_c (contenido crítico de humedad) la película superficial de humedad se reduce tanto por evaporación que el secado posterior produce puntos secos que aparecen sobre la superficie; estos ocupan cada vez porciones más grandes de la superficie expuesta al continuar el secado. Sin embargo, puesto que la rapidez N se calcula mediante la superficie gruesa constante A , el valor de N debe descender aun cuando la rapidez por unidad de superficie húmeda permanezca constante. Esto da lugar a la primera parte del periodo decreciente de la rapidez, el periodo de secado superficial no saturado. Finalmente, la película superficial original del líquido se habrá evaporado completamente a un contenido de humedad promedio de sólido. Esta parte de la curva puede faltar completamente, o puede constituir el periodo total decreciente de la rapidez.

Al continuar el secado, la rapidez con la cual se puede mover la humedad a través del sólido es el paso controlante, a causa de los gradientes de concentración que existen entre las partes más profundas y la superficie. Como la concentración de humedad generalmente decrece mediante el secado, la rapidez de movimiento interno de la humedad decrece. En algunos casos, la evaporación puede tener lugar debajo de la superficie del sólido en un plano o zona que se va hundiendo cada vez más profundamente en el sólido al irse secando. En cualquier caso la rapidez de secado decae aún más rápidamente que antes. En el punto en el cual el contenido de humedad del sólido ha caído hasta el valor en el equilibrio X^* para la humedad del aire predominante y el secado se detiene.

4.18. TIEMPO DE SECADO.



GRÁFICA 4. Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constante.

Fuente: (Mujundar, 2006).

Si se desea calcular el tiempo de secado de un sólido en las mismas condiciones para las cuales se ha determinado completamente una curva de contenido de humedad del producto vs tiempo de secado, simplemente se lee la diferencia en los tiempos que corresponden a los contenidos inicial y final de humedad mediante la curva.

Dentro de ciertos límites, algunas veces es posible calcular la apariencia de una curva de rapidez de secado para condiciones diferentes a las usadas en los experimentos. Con el fin de calcular el tiempo de secado para una curva de este tipo, se puede hacer lo siguiente:

Por definición, la rapidez de secado es:

$$N = - M_S \frac{\Delta X}{A \Delta t}$$

Reordenando e integrando en el intervalo de tiempo en que el contenido de humedad cambia de su valor inicial X_o a su valor final X_f ,

$$t = \int_0^t dt = \frac{M_S}{A} \frac{X_o}{X_f} \frac{dX}{N} \quad (4.6)$$

Dónde:

t: tiempo de secado [s].

M_S : masa sólido seco [kg].

A: superficie húmeda sobre la cual sopla el gas [m²].

N: velocidad de secado [kg/ m² s].

dX: diferencial del contenido de humedad [kg_H/kg_{SS}].

dt: diferencial del tiempo de secado [s].

4.18.1. Tiempo en el Periodo de Rapidez Constante.

Si el secado tiene lugar completamente dentro del periodo de rapidez constante, de forma que X_o y $X_f > X_c$ y $N = N_c$, la integral se resuelve teniendo lo siguiente.

$$t_{RC} = \frac{M_S(X_o - X_f)}{A N_c} \quad (4.7)$$

Dónde:

t_{RC} : tiempo de secado en el régimen constante [s].

M_S : es igual a la masa del producto en estado seco [kg].

A: Área de la superficie total de secado [m²].

X_o : El contenido de humedad del producto en base seca al inicio del proceso de secado [kg_{SH}/Kg_{SS}].

X_f : El contenido de humedad del producto en base seca al inicio del proceso de secado [kg_{SH}/Kg_{SS}].

N_c : rapidez de secado constante [kg/m² s].

4.18.2. Tiempo en el Periodo Decreciente de la Rapidez.

Si tanto X_o y $X_f < X_c$, de forma que el secado ocurre bajo condiciones cambiantes de N , se puede hacer lo siguiente:

Caso general. Para cualquier forma de la curva decreciente de la rapidez la integral se puede resolver gráficamente mediante la determinación del área bajo la curva de $1/N$ como ordenada, X como abscisa, cuyos datos se pueden obtener de la curva de rapidez de secado.

Caso especial. N es lineal o se la puede tomar como lineal en X , como en la región BC (**GRÁFICA 4**), en este caso

$$N = mX + b \quad (4.8)$$

En donde m es la pendiente de la porción lineal de la curva y b es una constante. Si se sustituye esta función en la integral antes descrita, se tiene:

$$t = - \frac{M_{SS}}{A} \int_{X_f}^{X_o} \frac{dX}{mX+b} = \frac{m_{SS}}{A m} \ln \frac{mX_o+b}{mX_f+b} \quad (4.9)$$

Sin embargo del grafico se puede deducir lo siguiente:

$$N_o = mX_o + b$$

$$N_f = mX_f + b$$

Despejando la pendiente e igualando tenemos:

$$m = \frac{N_o - N_f}{X_o - X_f}$$

Reemplazando se tiene lo siguiente:

$$t = \frac{m_{SS} (X_o - X_f)}{A (N_o - N_f)} \ln \frac{N_o}{N_f} \quad (4.10)$$

Con frecuencia, la curva decreciente de la rapidez total se puede tomar como una línea recta entre los puntos C y E **GRÁFICA 4**. Con frecuencia, esto se supone debido a la falta de datos. En este caso, se presentan las siguientes consideraciones:

$$N = m (X - X^*) = \frac{N_c (X - X^*)}{X_c - X^*} \quad (4.11)$$

Realizando el reemplazo correspondiente en la integral tenemos

$$t_{RD} = \frac{M_S (X_c - X^*)}{A N_c} \ln \frac{(X_o - X^*)}{X_f - X^*} \quad (4.12)$$

Dónde:

t_{DC} : tiempo de secado en el régimen decreciente [s].

M_S : es igual a la masa del producto en estado seco [kg]

A : Área de la superficie total de secado [m^2].

X_o : contenido de humedad en base seca al inicio de secado en estado de rapidez decreciente [kg_{SH}/Kg_{SS}]

X_f : contenido de humedad en base seca al final del proceso de secado en estado de rapidez decreciente [kg_{SH}/Kg_{SS}]

N_c : rapidez de secado constante [$kg/m^2 s$].

X_c : El contenido de humedad crítico del producto en base seca [kg_{SH}/Kg_{SS}].

X^* : El contenido de humedad en el equilibrio del producto en base seca [kg_{SH}/Kg_{SS}].

4.18.3. Tiempo Estimado Total de Secado.

En cualquier problema particular se secado, pueden intervenir tanto el periodo de rapidez constante como el decreciente según sean los valores relativos de X_1 , X_2 y X_c . Deben escogerse las ecuaciones y los límites adecuados. Por ende el tiempo total estimado de secado es igual:

$$t_T = t_{RC} + t_{RD} \quad (4.13)$$

Dónde:

t_T : tiempo total de secado [s].

t_{DC} : tiempo de secado en el régimen decreciente [s].

t_{RC} : tiempo de secado en el régimen constante [s].

4.19. MECANISMO DE SECADO POR LOTES.

Se van a considerar ahora con mayor detalle las diferentes partes de la curva de rapidez de secado. Los conocimientos actuales permiten describir razonablemente bien el proceso de secado en el periodo de rapidez constante; sin embargo, aún falta mucho para comprender los periodos decrecientes de la rapidez ya que dependen del tipo de proceso y de la clase de material que se va a secar, el presente apartado incluye una de las teorías que explican el periodo decreciente de la rapidez, la cual describe el comportamiento de la curva de rapidez en el periodo decreciente para el material que se pretende secar.

Como se mencionó anteriormente el proceso de secado tiene una amplia cantidad de aplicaciones y dependiendo de los requerimientos se puede desarrollar o escoger de una variada cantidad de equipos, los cuales han sido mencionados anteriormente en la clasificación de los secadores. Sin embargo el presente apartado no describirá a todos, se desarrolla en

particular las ecuaciones y procedimientos para el diseño de un secador directo por lotes, de circulación de gas tangencial de lecho estático.

4.20. SECADO POR CIRCULACIÓN TANGENCIAL.

El periodo de rapidez constante, en el cual ocurre la evaporación superficial de la humedad no ligada, se ha demostrado que la rapidez de secado se establece mediante un balance de las necesidades caloríficas para la evaporización y la rapidez con la cual el calor alcanza la superficie. Si un sólido de espesor e_p se coloca sobre un plato de espesor e_s y todo el conjunto se sumerge en una corriente de gas secante con una temperatura T_G y una humedad w masa de vapor de agua / masa de aire seco, que fluye con una velocidad de transferencia de masa G masa / tiempo área. La evaporación de humedad tiene lugar desde la superficie superior A, que está a una temperatura T_{sup} . La superficie que se está secando recibe calor de diferentes fuentes:

- Calor por convección desde la corriente gaseosa.
- Calor por conducción a través del sólido.
- Calor por radiación directa de una superficie caliente.

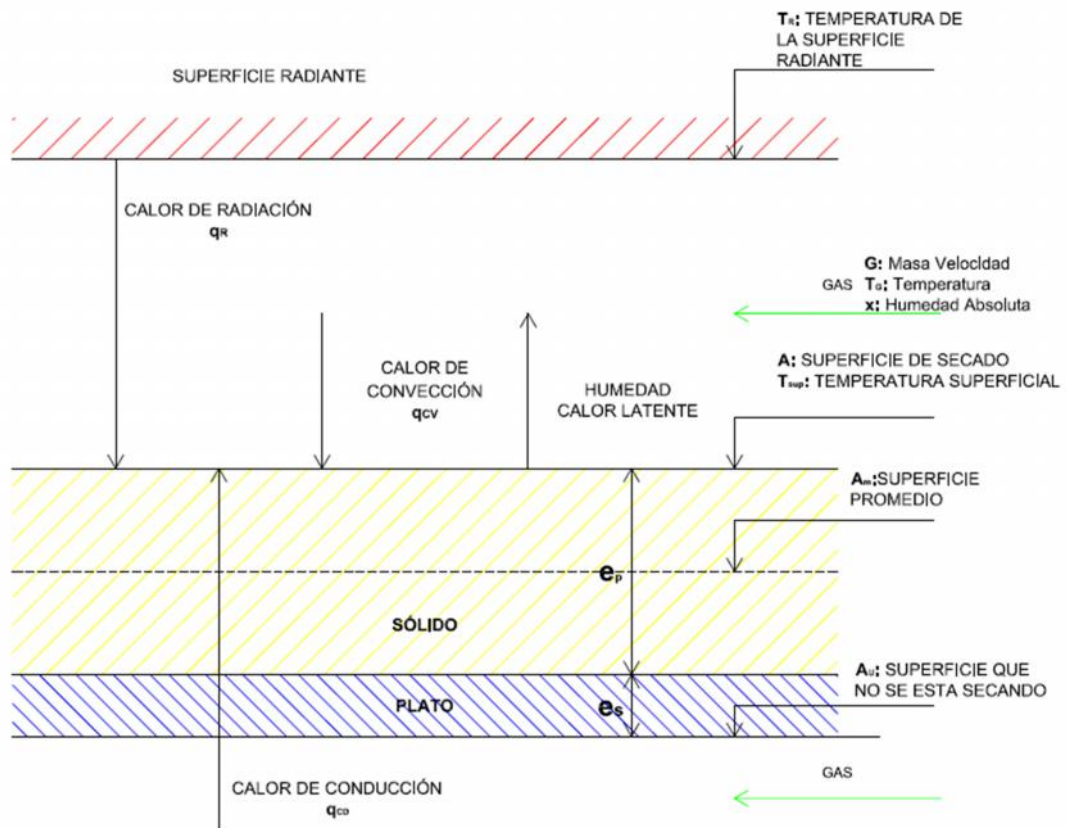


FIGURA 26. Secado por circulación tangencial.
Parámetros y Esquema de sus respectivos balances dentro del proceso.

Fuente: (Treybal, 1988).

Todos expresados como un flux, energía/tiempo área del sólido para la transferencia de calor. El calor llega a la superficie por estos métodos y elimina la humedad evaporándola, de forma que la temperatura superficial permanece constante en T_{sup} .

La rapidez de evaporación y la temperatura superficial pueden obtenerse mediante un balance de calor. Si q_T representa el calor total que llega a la superficie, entonces tenemos:

$$q_T = q_{cv} + q_{cd} + q_R$$

Dónde:

q_T : Calor por convección desde la corriente gaseosa [kJ/s m^2].

q_{CV} : Calor por convección desde la corriente gaseosa [kJ/s m^2].

q_{CD} : Calor por conducción a través del sólido [kJ/s m^2].

q_R : Calor por radiación directa de una superficie caliente [kJ/s m^2].

Si se desprecia el calor para sobrecalentar la humedad evaporada hasta la temperatura del gas y considerando solo el calor latente de evaporización h_{fg} , entonces el flux de evaporación N_c y el flux de flujo de calor están relacionados de la siguiente manera:

$$N_c h_{fg} = q_T \quad (4.14)$$

Dónde:

N_c : Rapidez de evaporación secado a velocidad constante [$\text{kg}_{ev}/\text{m}^2\text{s}$].

h_{fg} : Entalpia de evaporización de la sustancia húmeda [kJ/kg].

q_T : Calor por convección desde la corriente gaseosa [kJ/s m^2].

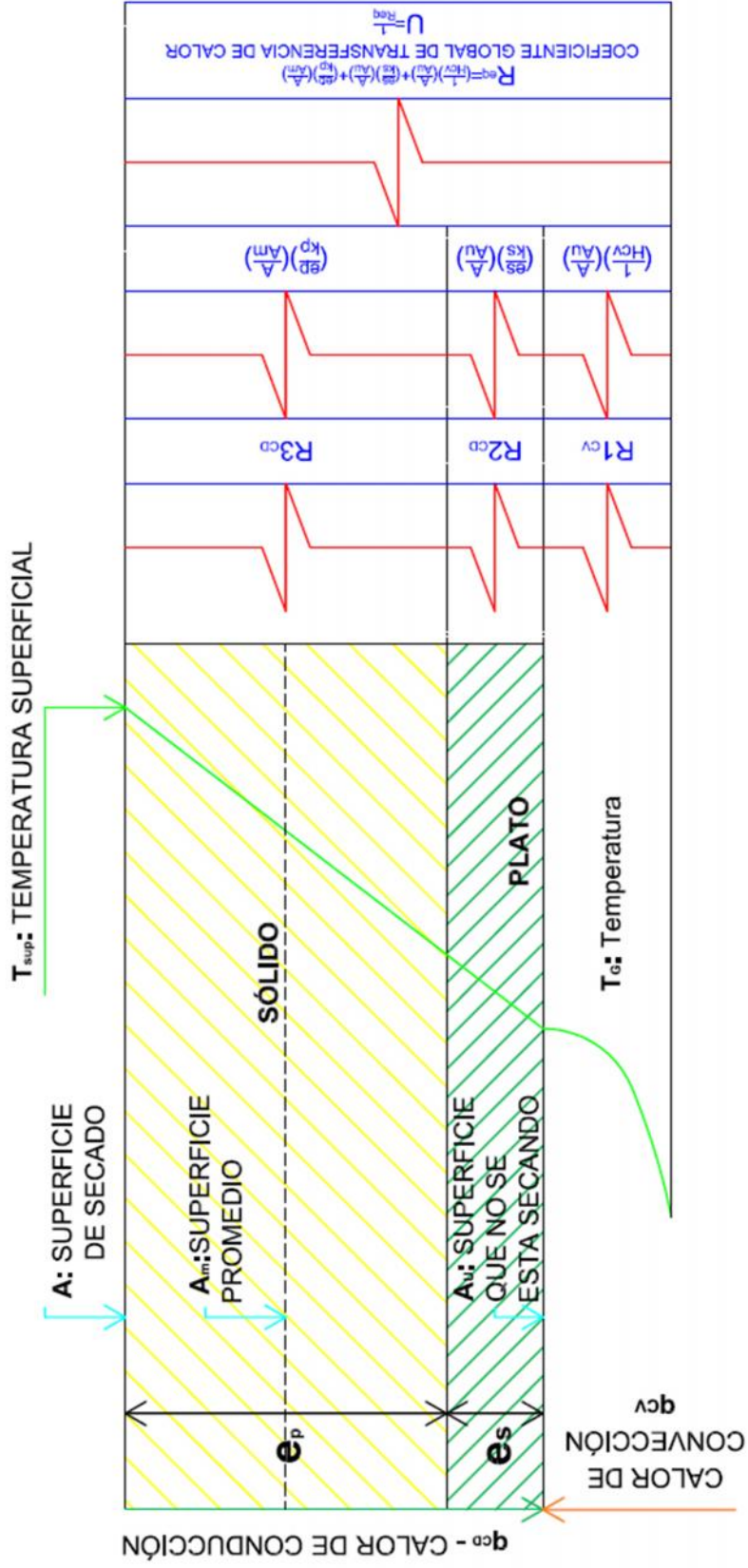


FIGURA 27. Secado en la etapa de rapidez constante. Análisis de la transferencia de calor con analogía de la resistencia eléctrica entre el producto, soporte y gas.

Fuente: (Treybal, 1988).

El calor recibido por convección y conducción a través del sólido puede calcularse por los métodos usuales para la transferencia de calor a través de una serie de resistencias como se muestra en la **FIGURA 27**, teniendo lo siguiente.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{CV}A_u} + \frac{L_s}{k_s A_u} + \frac{L_p}{k_p A_m}} \quad (4.15)$$

Dónde:

U: Coeficiente global de transferencia de calor [W/K].

h_{CV} : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W / m²].

k_s : Coeficiente de conductividad térmica del soporte [W/m °K].

L_s : Espesor del soporte [m].

k_p : Coeficiente de conductividad térmica del producto [W/m °K].

L_p : Espesor del soporte [m].

A: Superficie de total de secado [m²].

A_u : Superficie de total que no se está secando [m²].

A_m : Superficie promedio del sólido que se está secando [m²].

El cálculo de la transferencia de calor del sistema es el siguiente:

$$q_{CD} = U T_G - T_{sup} \quad (4.16)$$

Dónde:

U: Coeficiente global de transferencia de calor [W/°K].

T_G : temperatura del gas que [°K].

T_{sup} : temperatura superficial del producto que se está secando [°K].

Al combinar las ecuaciones anteriormente descritas tenemos lo siguiente e incluyendo al sistema la resistencia de calor por radiación tenemos:

$$K_Y w_{sup} - w_G = N_c = \frac{q_T}{h_{fg}} = \frac{(h_{CV}+U) T_G - T_{sup} + h_R T_R - T_{sup}}{h_{fg}} \quad (4.17)$$

La relación de la izquierda representa a la primera ley de Fick para la transferencia de masa

Dónde:

K_Y : Coeficiente de transferencia de masa del gas [m/s]

w_{sup} : concentración en la superficie [kg/m³]

w_G : concentración en el gas [kg/m³]

Debe conocerse la temperatura superficial para poder utilizar esta relación. Esta puede obtenerse considerando la igualdad de la derecha, que puede arreglarse y reordenarse, teniendo lo siguientes:

$$\frac{w_{sup}-w_G}{\frac{h_{CV}}{K_Y}} = 1 + \frac{U}{h_{CV}} T_G - T_{sup} + \frac{h_R}{h_{CV}} T_R - T_{sup} \quad (4.18)$$

En la ecuación $\frac{w_{sup}-w_G}{\frac{h_{CV}}{K_Y}} = 1 + \frac{U}{h_{CV}} T_G - T_{sup} + \frac{h_R}{h_{CV}} T_R - T_{sup}$ (4.18) la relación entre el coeficiente de transferencia de calor por convección y el coeficiente de transferencia de masa se obtiene mediante las relaciones entre los grupos adimensionales seleccionados Sc^7 , Pr^8 y Le^9 para la interacción de la transferencia de masa y la transferencia de calor¹⁰.

La relación de Lewis. Para el sistema aire-vapor de agua se ha demostrado que h_{CV} / k_Y es aproximadamente igual a C_p , o a su vez que aproximadamente $h_G / k_Y C_p = 1$. Esta es la llamada relación de Lewis (por W.K Lewis). Esto no solo lleva a la casi igualdad de las temperaturas de

⁷ Número de Schmidt (Razón de las difusividades de momento y masa)

⁸ Número de Prandtl (Razón de las difusividades de momento y térmica)

⁹ Número de Lewis (Razón de las difusividades térmica y masa).

¹⁰ (Incropera & DeWitt, 1999, págs. 318-322)

bulbo húmedo y de saturación adiabática (como en el caso de aire-vapor de agua), sino a otras simplificaciones. Por otro lado la relación de Lewis solo se considera si la difusividad térmica y molecular son idénticas, o más bien dicho si $Sc = Pr$ lo que a su vez significa que $Le = 1$. En consecuencia Le es básicamente 1 para aire-vapor de agua, pero no para la mayoría de los sistemas.

Puesto que w_{sup} es la humedad a saturación del gas que corresponde a T_{sup} cuando se está evaporando la humedad no confinada, estas cantidades pueden encontrarse resolviendo la ecuación anteriormente descrita simultáneamente con la curva de humedad a saturación en una carta psicrométrica.

Si la conducción a través del sólido y los efectos de radiación están ausentes la temperatura superficial es la temperatura de bulbo húmedo del gas. Las superficies que se están secando también están a la temperatura de bulbo húmedo, si el sólido se seca en toda la superficie en ausencia de radiación. Cuando se colocan charolas o platos de material que se van a secar unos encima de otros, la mayor parte del sólido solo recibirá radiación del fondo de la charola que se encuentra inmediatamente encima del sólido a menos que las temperaturas del gas sean muy elevadas, es probable que no sea importante esa radiación. Por lo tanto, es esencial no acentuar demasiado el calor recibido por radiación cuando se realizan pruebas de secado sobre pares únicos de platos.

Para el **flujo de gas paralelo a una superficie** y confinando entre platos paralelos, los coeficientes de transferencia de calor h_{CV} y de transferencia de masa K_Y se encuentran descritos mediante la analogía entre la transferencia de masa y calor simultaneo. La aplicación de la analogía de la transferencia de calor-masa, para $2600 < Re < 2200$, tiene como resultado:

$$j_H \frac{h_{CV}}{C_p G} Pr^{2/3} = j_D \frac{K_Y}{G_S} Sc^{2/3} = 0.11 Re^{-0.29} \quad (4.19)$$

Dónde:

h_{CV} : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W / m^2].

C_p : calor específico [$kJ/kg \text{ } ^\circ C$]

G : masa velocidad del gas [$kg/m^2 \text{ s}$].

Pr : Número de Prandtl.

K_Y : coeficiente de transferencia de masa del gas [m/s]

Sc : Número de Schmid

Re : Número de Reynold.

Para Reynolds

$$Re = \frac{\phi_{eq} G}{\mu} \quad (4.20)$$

Dónde:

ϕ_{eq} : es el diámetro equivalente del espacio para el flujo de aire [m].

G : masa velocidad del gas [$kg/m^2 \text{ s}$].

μ : viscosidad dinámica [Ns/m^2].

Con propiedades del aire a $95^\circ C$ la ecuación anterior se transforma:

$$h_{CVs} = 5.90 \frac{G^{0.71}}{\phi_{eq}^{0.29}} \quad (4.21)$$

Dónde:

$$G = \rho v \quad (4.22)$$

$$\phi_{eq} = \frac{1.30 (ab)^{0.625}}{(a+b)^{0.25}} \quad (4.23)$$

h_{CVs} : coeficiente de convección del aire de secado¹¹ flujo paralelo [W/m² °K].

G: coeficiente masa velocidad del gas [kg/m² s].

ρ : densidad del aire de secado [kg/m³].

v: velocidad del aire de secado [m/s].

Φ_{eq} : diámetro equivalente para figuras rectangulares¹² [m].

a: longitud de la sección rectangular [m].

b: ancho de la sección rectangular [m].

“Las relaciones desarrolladas permiten el cálculo directo de la rapidez de secado durante el periodo de rapidez constante, pero no deben considerarse como sustituto totales de las mediciones experimentales. Tal vez su mayor valor es que conjuntamente con los limitados datos experimentales sirven para predecir el efecto de cambiar las condiciones de secado.” (Treybal, 1988, pág. 745.)

4.21. CONSIDERACIONES Y EFECTOS DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE SECADO.

4.21.1. Efecto de la Velocidad del Gas.

Si la radiación y la conducción a través del sólido son despreciables, N_c es proporcional a $G^{0.71}$ para flujo paralelo. Si la radiación y la conducción están presentes, el efecto del flujo será menos importante.

4.21.2. Efecto de la Temperatura del Gas.

Al aumentar la temperatura del aire aumenta la cantidad $T_G - T_{sup}$; por lo tanto, aumenta N_c . en ausencia de efectos de radiación, y despreciando la

¹¹ Para el sistema inglés: $G=lb/h\ ft^2$, $\rho=ft$, $hcv= BTU/h\ ft^2$, el coeficiente para la ecuación (4.21), toma el valor de 0.0135.

¹² (ASHRAE, 2009, pág. 21.7)

variación de h_{fg} en rangos moderados de temperatura, N_c es directamente proporcional a $T_G - T_{sup}$.

4.21.3. Efecto de la Humedad del Gas.

N_c varía directamente con $w_{sup} - w_G$; en consecuencia, al aumentar la humedad disminuye la rapidez de secado. Generalmente, en los cambios en w_G y T_G intervienen cambios simultáneos de T_{sup} y w_{sup} ; los efectos se calculan mejor aplicando la igualdad de relaciones entre transferencia de calor y masa en balance con entalpía de evaporización.

4.21.4. Efecto del Espesor del Sólido que se Está Secando.

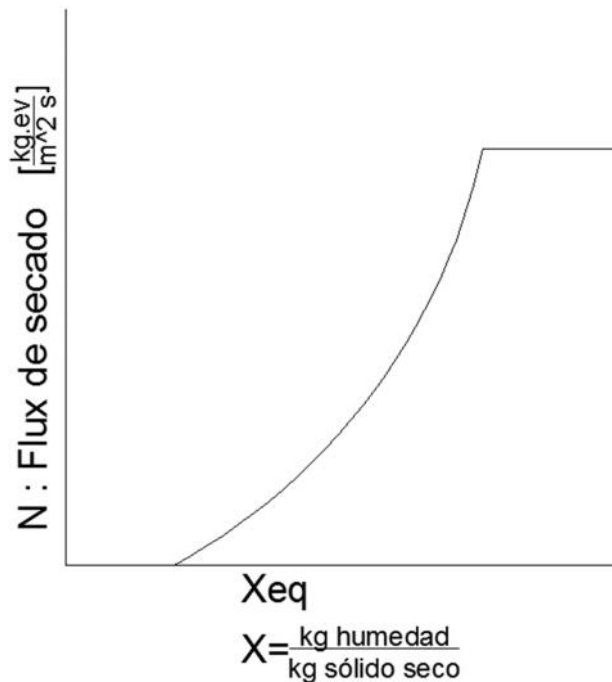
Si ocurre la conducción de calor a través del sólido, las ecuaciones con respecto al sólido indican valores más reducidos de N_c al aumentar el espesor del sólido. Sin embargo, la conducción de calor a través de las superficies de los bordes en las charolas y platos puede ser una fuente importante de calor que aumente la rapidez de secado si la superficie de los bordes es grande. Si las superficies que no se están secando están bien aisladas, o si el secado ocurre en todas las superficies del sólido, N_c es independiente del espesor. El tiempo para el secado entre contenidos fijos de humedad dentro del periodo de rapidez constante será entonces directamente proporcional al espesor.

4.22. MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD DENTRO DEL SÓLIDO.

Cuando ocurre la evaporación superficial, debe haber un movimiento de la humedad desde el interior del sólido hasta la superficie. La naturaleza del movimiento modifica el secado durante el periodo decreciente de la rapidez. Con el fin de apreciar la naturaleza diversa de las porciones observadas en el periodo decreciente de la rapidez de la curva de secado, se analizarán

brevemente una de las teorías expuestas para explicar el movimiento de la humedad y la relación de estas con las curvas de decaimiento de la rapidez.

4.22.1. Difusión del Líquido.



GRÁFICA 5. Periodo de rapidez decreciente controlada por la difusión.

Fuente: (Treybal, 1988).

La difusión de la humedad líquida puede derivarse de los gradientes de concentración entre el interior del sólido, donde la concentración es alta, y la superficie, donde es baja. Estos gradientes se fijan durante el secado de la superficie. Este método de transporte de la humedad se limita probablemente a los casos en que se forman soluciones sólidas de una sola fase con la humedad, como en el caso del jabón, goma, gelatina y similares, y en ciertos casos en que se está secando la humedad ligada, como en el secado de las últimas partes de agua en arcillas, harinas, textiles, papel y madera. Se ha descubierto que la difusividad de la humedad generalmente decrece con rapidez al decrecer el contenido de humedad.

Durante el periodo de rapidez constante de secado de estos sólidos, la concentración de humedad superficial se reduce, pero la concentración en el interior del sólido permanece elevada. Las altas difusividades resultantes permiten que la humedad se mueva hasta la superficie tan rápido como se evapora y la rapidez de secado permanece constante. Cuando aparecen manchas secas debido a la proyección de partes del sólido en la película gaseosa, se tiene un periodo de evaporación superficial no saturada. Al final, la superficie se seca hasta el contenido de humedad en el equilibrio para el gas predominante. El secado posterior solo sucede a flujos que están completamente controlados por las rapidezces de difusión dentro del sólido, puesto que estas son lentas a contenidos bajos de humedad. Si el secado inicial a rapidez constante es muy rápido, quizá no aparezca el periodo de evaporación superficial no saturada; el periodo decreciente de la rapidez controlado por la difusión empieza inmediatamente después de que termina el periodo de rapidez constante, como se aprecia en la **GRÁFICA 5**.

En muchos casos de secado, en donde el mecanismo de difusión explica satisfactoriamente la rapidez de secado como función del contenido de humedad promedio, la distribución de humedad dentro del sólido en las diferentes etapas del secado no se asemeja a este mecanismo. La aplicabilidad superficial del mecanismo de difusión es entonces aparentemente accidental.

CAPÍTULO 5.

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN.

5.1. DISEÑO.

El objetivo de este proyecto es el diseño y construcción de un secador para piezas de cerámica blanca mediante el uso de convección forzada y acondicionamiento de aire ambiente, en el presente capítulo se desarrollará la memoria de cálculo del diseño del secador.

Para el prototipo se establece una cantidad de producto en estado húmedo de 15 [kg] de masa.

$$M_p := 15 \cdot (\text{kg})$$

Considerando la densidad de la cerámica blanca con un valor $\rho_p^{13} = 2600 [\text{kg}/\text{m}^3]$, se calcula el volumen del producto a secar.

$$V_p := \frac{M_p}{\rho_p} = 5.769 \times 10^{-3} \cdot (\text{m}^3)$$

5.1.1. Dimensionamiento del Secador.

En base al volumen del producto calculado anteriormente, se realiza el dimensionamiento de la cámara de secado, se propone una geometría de prisma rectangular cuya base, techo y sus caras laterales sean rectángulos en los cuales se puedan colocar piezas de cerámica de variadas formas, las medidas propuestas son las siguientes:

¹³ (ASHRAE, 2009, pág. 33.4)

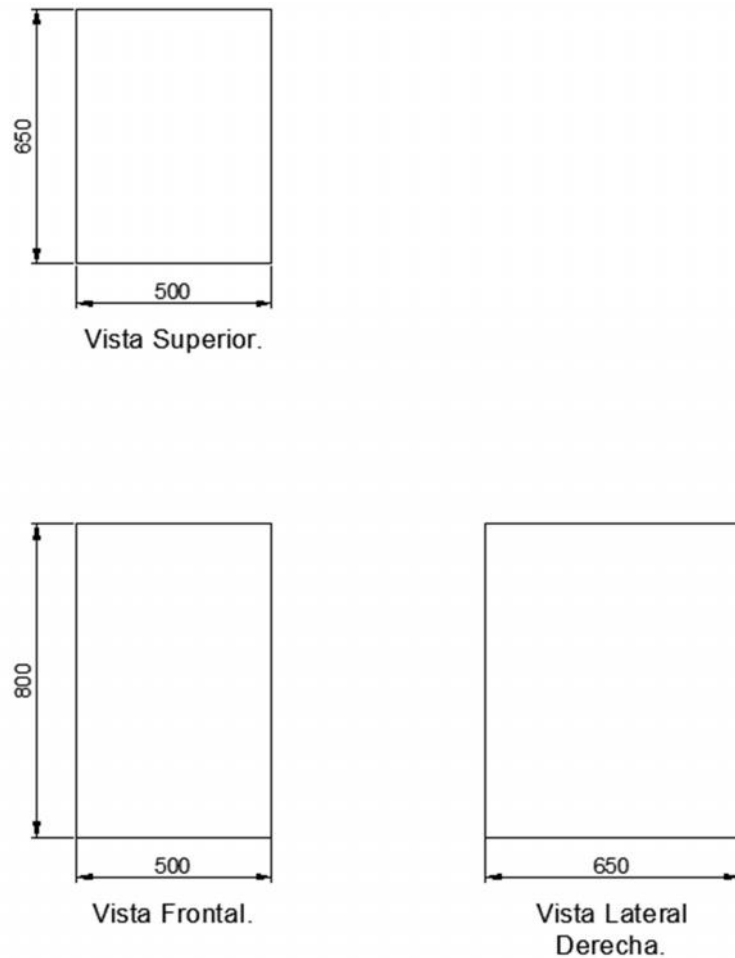


FIGURA 28. Esquema y dimensionamiento de la cámara de secado.

$$L_{CS} := 0.65 \text{ (m)}$$

$$A_{CS} := 0.5 \text{ (m)}$$

$$H_{CS} := 0.8 \text{ (m)}$$

Con los valores de sus dimensiones se calcula el volumen de la cámara de secado.

$$V_{CS} := L_{CS} \cdot A_{CS} \cdot H_{CS} = 0.26 \text{ (m}^3\text{)}$$

Se realiza una comparación con respecto al volumen del producto con el objetivo de verificar que el volumen del producto sea menor al volumen de secado y de esta manera garantizar que el producto pueda estar dentro de la

cámara de secado; por otro lado una consideración que suele ser tomada en cuenta, es que exista por lo menos un relación de 4 a 1 entre el volumen de la cámara de secado y el volumen del producto¹⁴.

$$V_p := \frac{M_p}{\rho_p} = 5.769 \times 10^{-3} \cdot (\text{m}^3)$$

$$V_{p1} := 4V_p = 0.023 (\text{m}^3)$$

$$V_{cs} := L_{cs} \cdot A_{cs} \cdot H_{cs} = 0.26 (\text{m}^3)$$

$$V_{cs} \geq 4 \cdot V_p = 1$$

De la comparación tenemos que las dimensiones propuestas cumplen con los requerimientos.

5.1.2. Análisis del producto.

Es necesario calcular el peso del producto en sus diferentes estados.

5.1.3. Masa seca del producto.

Para el cálculo de la masa seca de producto partimos de la masa total $M_p = 15[\text{kg}]$ del producto y el contenido de humedad en base húmeda $X_{BH}^{15} = 0.36[\text{kg}_{SS}/\text{kg}_{SH}]$, teniendo lo siguiente:

$$M_p = 15 \cdot (\text{kg})$$

$$X_{BH} := 0.36 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

$$M_S := M_p \cdot (1 - X_{BH}) = 9.6 \cdot (\text{kg})$$

¹⁴ INCOMAQ, Italia, 1990.

¹⁵ (Perry, 1994, págs. 12-63)

5.1.4. Masa húmeda del producto.

Una vez calculada la masa seca del producto $M_S = 9.6[\text{kg}]$ y conociendo la masa total del producto $M_p = 15[\text{kg}]$ se puede calcular la masa húmeda, teniendo lo siguiente:

$$M_H := M_p - M_S = 5.4(\text{kg})$$

5.1.5. Cálculo del porcentaje de humedad inicial del producto en base seca.

Para el cálculo del porcentaje de humedad inicial en base seca del producto es necesario conocer el porcentaje de humedad inicial en base húmeda, en este punto del diseño hay que tomar en cuenta que el porcentaje de humedad de la cerámica blanca es igual al 36% sin embargo ese porcentaje corresponde al estado en barbotina.

El porcentaje de humedad inicial del producto antes de comenzar el secado es menor al valor del porcentaje de humedad en estado en barbotina ya que antes del secado los productos cerámicos pierden humedad en el proceso de moldeo, para la estimación del tiempo de secado se asumirá que el producto antes del proceso de secado llega a tener un porcentaje de humedad inicial en base humedad $X_{i_{BH}} = 0.2 \text{ kg}_{SS} / \text{kg}_{SH}$.

Para el cálculo del porcentaje de humedad inicial del producto en base seca se desarrolla la siguiente ecuación:

$$X_{i_{BH}} := 0.2 \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

$$X_{i_{BS}} := \frac{X_{i_{BH}}}{1 - X_{i_{BH}}} = 0.25 \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

Como resultado el porcentaje de humedad inicial en base seca es $X_{i_{BS}} = 0.25 [\text{kg}_{SH} / \text{kg}_{SS}]$.

5.1.6. Cálculo del porcentaje de humedad final del producto en base seca.

Para determinar el porcentaje de humedad final del producto en base seca se utiliza el mismo procedimiento que se utilizó para obtener el porcentaje de humedad inicial del producto en base seca, el contenido de humedad final del producto en base húmeda, el cual es un requerimiento del producto, para la cerámica blanca es de $X_{f_{BH}} = 0.09$ [kg_{SS}/ kg_{SH}].

$$X_{f_{BH}} := 0.09 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

$$X_{f_{BS}} := \frac{X_{f_{BH}}}{1 - X_{f_{BH}}} = 0.099 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

Como resultado el porcentaje de humedad final en base seca es $X_{f_{BS}} = 0.099$ [kg_{SH}/ kg_{SS}].

5.1.7. Cálculo de la cantidad de agua a remover en el proceso de secado.

Para el cálculo de la cantidad de agua removida se emplea la siguiente ecuación que involucra la variación del contenido de humedad en base seca:

$$\Delta M_{ag} := M_S \cdot (X_{i_{BS}} - X_{f_{BS}})$$

Los valores para el desarrollo de la ecuación se calcularon anteriormente, reemplazando tenemos:

$$\Delta M_{ag} := M_S \cdot (X_{i_{BS}} - X_{f_{BS}}) = 1.451 \cdot (\text{kg})$$

5.1.8. Cálculo de las propiedades del aire atmosférico.

El objetivo de este proyecto es secar piezas de cerámica blanca mediante el acondicionamiento de aire ambiente por tal razón se necesita calcular las propiedades del aire antes y después del proceso de acondicionamiento.

Para el cálculo de las propiedades psicrométricas del aire ambiente es necesario conocer dos propiedades del aire ambiente y la presión atmosférica para encontrar las propiedades restantes.

- El valor de la presión atmosférica $P_{atm}^{16} = 73.9$ [kPa], se calcula de la interpolación para la altura de 2800msnm la correspondiente a la altura de Quito.
- El valor de la temperatura corresponde a $T_{amb}^{17} = 16.1$ [°C] para el aire ambiente en Quito.
- El valor del porcentaje de humedad relativa corresponde a $HR^{18} = 13.3$ [%] para el aire ambiente en Quito.

Para el cálculo de las propiedades del aire a temperatura de secado $T_{amb} = 16.1$ [°C], presión de 73.9 [kPa] y con humedad relativa del aire $HR = 13.3$ [%] se utiliza el software EES (Engineering Equation Solver).

¹⁶ (ASHRAE, 2009, pág. 1.1)

¹⁷ (ASHRAE, 2009, pág. 14.34)

¹⁸ (ASHRAE, 2009, pág. 14.34)

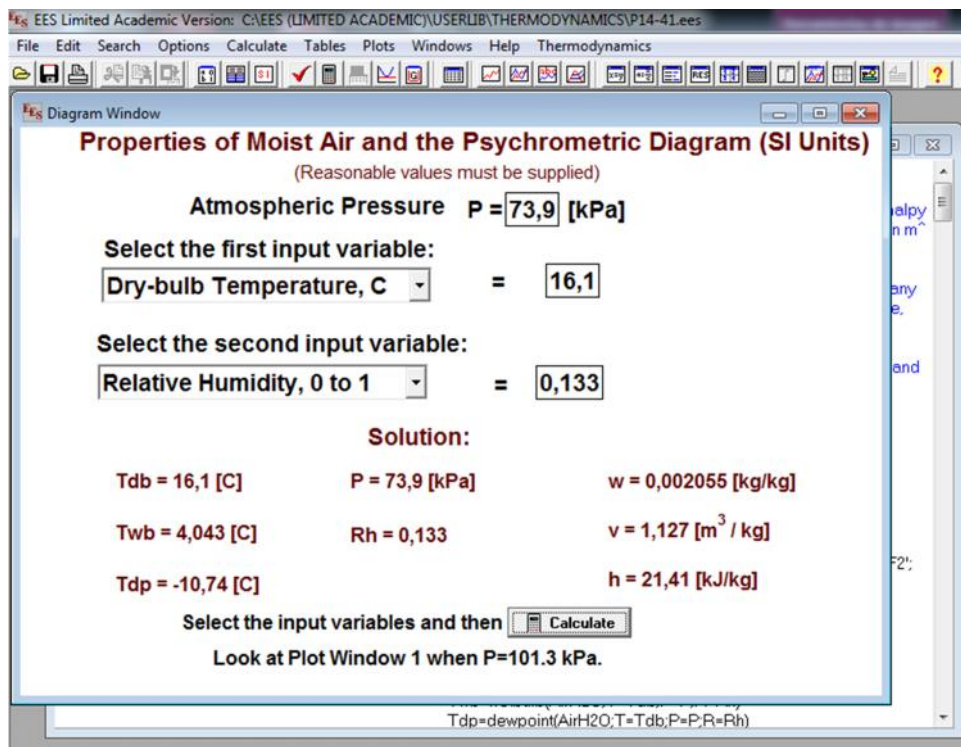


FIGURA 29. Propiedades psicrometricas del aire a T_{amb} , P_{atm} y HR_{amb} . (Software EES)

Para:

$$P_Q := 0.73 \text{ atm} = 7.397 \times 10^4 \cdot (\text{Pa})$$

$$T_{amb} := 16.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$HR := 13.3(\%)$$

Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 4. Propiedades Psicrométricas del Aire a T_{amb} , P_{atm} y HR_{amb} .

Aire Ambiente.	
P_{atm}	73.9 [kPa]
T_{BS}	16.1 [°C]
HR	13.3 [%]
w	0.002055 [kgva/kgas]
v	1.127 [kg/m ³]
h	21.41 [kJ/kgas]

5.1.9. Cálculo de las propiedades del aire de secado.

El cálculo de las propiedades del aire de secado es necesario para cálculos posteriores.

5.1.10. Cálculo de la humedad absoluta del aire de secado.

A temperatura de secado $T_{\text{sec}} = 50[\text{°C}]$, y si el acondicionamiento de aire es por calentamiento simple el valor de la humedad absoluta permanece constante.

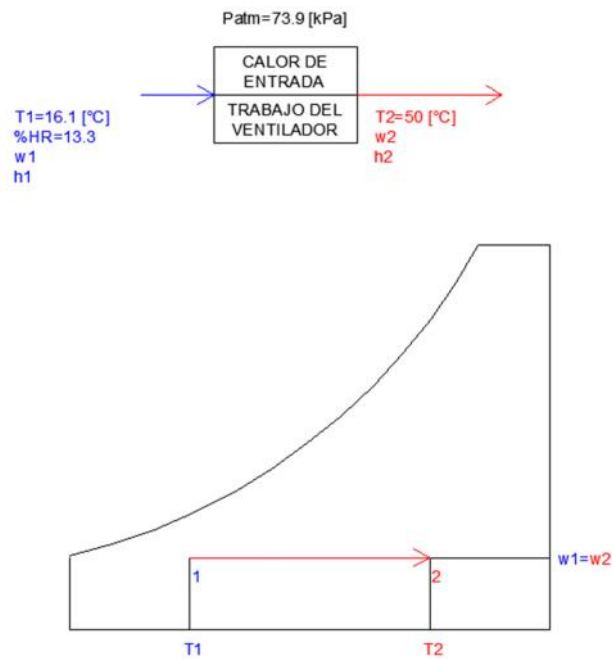


FIGURA 30. Diagrama del proceso de acondicionamiento del aire sobre la carta psicrométrica ($T_{\text{amb}} - T_{\text{sec}}$).

Por lo tanto el valor de la humedad absoluta del aire de secado es igual al valor de la humedad absoluta del aire ambiente de la **TABLA 4** teniendo:

$$w_{\text{sec}} := w_{\text{amb}} = 2.055 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

Si la presión del aire permanece constante entonces podemos encontrar las propiedades del aire a temperatura de secado.

Para el cálculo de las propiedades del aire a temperatura de secado $T_{\text{sec}} = 50[^\circ\text{C}]$, presión de 73.9 kPa y con humedad absoluta del aire $w_{\text{sec}} = 0.002055[\text{kg}_{\text{va}}/\text{kg}_{\text{as}}]$ se utiliza el software EES (Engineering Equation Solver).

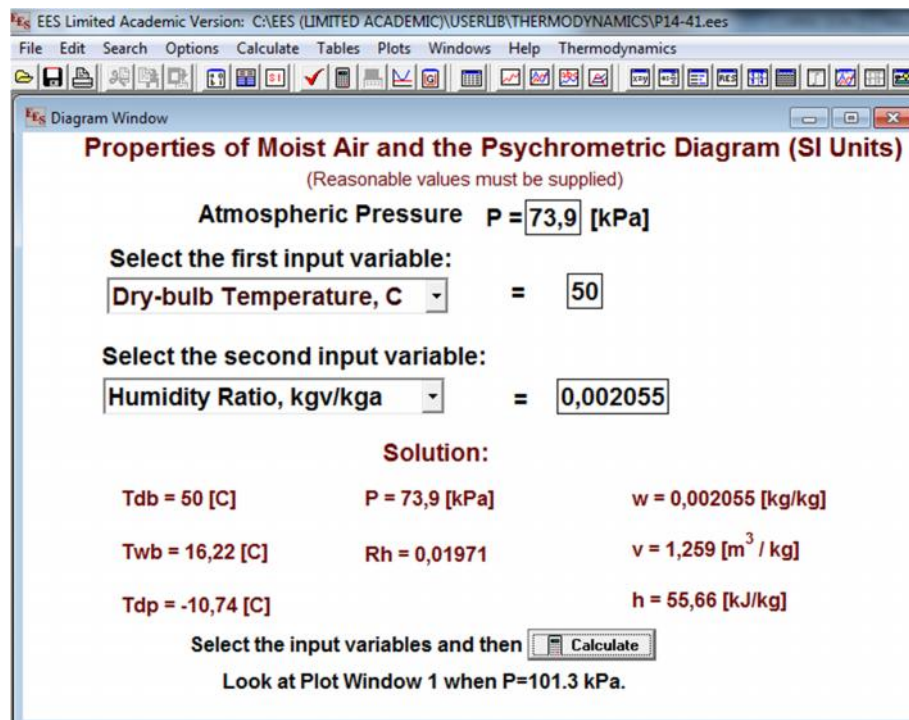


FIGURA 31. Propiedades psicrometricas del aire a T_{sec} , P_{atm} y w_{sec} . (Software EES)

Para:

$$T_{\text{sec}} := 50(^{\circ}\text{C})$$

$$P_Q = 7.397 \times 10^4 \cdot (\text{Pa})$$

$$w_{\text{sec}} := w_{\text{amb}} = 2.055 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 5. Propiedades Psicrométricas del Aire a T_{sec} y P_{atm} .

Aire a Temperatura de Secado.		
P_{atm}	73.9	[kPa]
T_{BS}	50	[°C]
W	0.002055	[kgva/kgas]
HR	1.971	[%]
V	1.259	[kg/m ³]
H	55.66	[kJ/kgas]

5.1.11. Cálculo de la densidad del aire de secado.

Como se ha mencionado antes, las propiedades del aire se pueden calcular con el uso de ecuaciones, mediante el uso de graficas como las cartas psicrométricas o mediante el uso de software.

De la **TABLA 5** obtenemos el valor del volumen específico del aire y con este se puede calcular el valor de la densidad a las condiciones de secado. Teniendo lo siguiente:

$$v_{\text{sec}} := 1.259 \cdot \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\rho_{\text{sec}} := \frac{1}{v_{\text{sec}}} = 0.794 \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

5.1.12. Calor específico del aire de secado C_p .

Sin embargo, como se mencionó anteriormente en el apartado 3.3.9 para temperaturas menores a 50[°C] se puede considerar al aire como un gas ideal con valor de calor específico de 1.005 [kJ/kg K] con un error insignificante, valor que será considerado para los posteriores cálculos.

5.1.13. Cálculo del coeficiente masa velocidad del gas.

El valor se calcula mediante el uso de la ecuación:

$$G = \rho v \quad (4.22)$$

La velocidad del aire es un parámetro de diseño y se establece con un valor de $v_{\text{sec}} = 3\text{m/s}$ y el valor de la densidad $\rho = 0.794[\text{kg/m}^3]$ se calculó anteriormente en el apartado 5.1.11. Reemplazando tenemos:

$$G_{\text{sec}} := \rho_{\text{sec}} \cdot v_{\text{sec}} = 2.383 \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

5.1.14. Cálculo del diámetro equivalente del producto para el aire de secado.

El diámetro equivalente del producto se define como el diámetro por el cual pasaría el aire de secado si se considerara al área de sección del producto como el área de sección de una tubería de geometría circular.

Para este caso se realizará un arreglo en base al volumen del producto y el espesor de pared; las piezas de cerámica blanca aunque se presentan en una cantidad muy basta de formas, todas en su mayoría son huecas y por lo general tienen un espesor de pared de 1[cm] hasta 1[in], de lo contrario al momento de ser cocidas presentan problemas agrietamiento, para el diseño asumiremos piezas con un espesor de pared de 2[cm].

El volumen del producto $V_p = 0.005769[\text{m}^3]$ se calculó en el apartado 5.1.1 y con el valor de espesor de pared $e_p = 2[\text{cm}]$ podemos encontrar el valor de su correspondiente área.

$$V_p = 5.769 \times 10^{-3} \cdot (\text{m}^3)$$

$$e_p := 2(\text{cm}) = 0.02 \cdot (\text{m})$$

$$Ab_p := \frac{V_p}{e_p} = 0.288 \cdot (\text{m}^2)$$

Si asumimos que el producto tendrá una geometría similar a la que presenta la cámara de secado podemos calcular las dimensiones del producto en base a las relaciones dimensionales que presenta la cámara de secado. Teniendo lo siguiente:

Para la cámara de secado las dimensiones longitud L_{cs} y ancho A_{cs} se obtuvieron en el apartado 5.1.1 y su correspondiente relación se calcula:

$$L_{cs} := 0.65 \cdot (\text{m})$$

$$A_{cs} := 0.5 \cdot (\text{m})$$

$$R_{cs} := \frac{L_{cs}}{A_{cs}} = 1.3$$

Aplicamos esta relación para el cálculo de la longitud L_p y ancho a_p teniendo lo siguiente:

$$A_p := \sqrt{\frac{Ab_p}{1.3}} = 0.471 \cdot (\text{m})$$

$$L_p := 1.3 \cdot A_p = 0.612 \text{ m}$$

Ahora hay que analizar cuál va a ser la sección transversal por la que va a pasar el aire de secado.

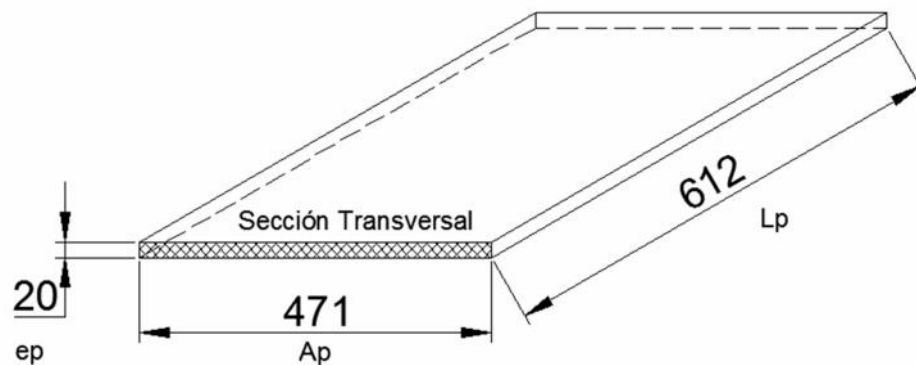


FIGURA 32. Esquema del área de sección para el cálculo del diámetro equivalente del producto.

Con los valores de: espesor de pared y ancho de producto se puede encontrar el valor del diámetro equivalente con la fórmula para el diámetro equivalente descrita en el apartado 4.20, teniendo lo siguiente:

$$\phi_{eqsec} := \frac{1.3(e_p \cdot A_p)^{\frac{5}{8}}}{(e_p + A_p)^{\frac{1}{4}}} = 0.084 \cdot (m)$$

5.1.15. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección h_{CV} del aire de secado.

Para el caso de secado tangencial el valor del coeficiente de convección que interactúa con el producto se calcula mediante la ecuación que se presenta a continuación y que se describió en el apartado 4.20.

$$h_{CVs} = 5.90 \frac{G^{0.71}}{\phi_{eq}^{0.29}} \quad (4.21)$$

Reemplazando los valores del diámetro equivalente del producto obtenidos en el apartado 5.1.14 y el valor del coeficiente de masa velocidad

del aire obtenido en el apartado 5.1.13, ambos calculados anteriormente, podemos calcular el coeficiente de convección del aire que interactúa con el producto en el proceso de secado. Teniendo:

$$h_{cv_{sec}} := \frac{5.9 \cdot G_{sec}^{0.71}}{\phi_{eqsec}^{0.29}}$$

$$h_{CV_{sec}} := 22.405 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

5.1.16. Análisis de la transferencia de calor y transferencia de masa entre el producto y el aire de secado.

El análisis de la transferencia de calor y masa del producto y su interacción con el aire de secado es el procedimiento que se utilizara para encontrar el valor de la temperatura superficial del producto T_{sup} y del valor de la humedad absoluta en la superficie w_{sup} , los cuales son parámetros necesarios para los posteriores cálculos.

5.1.17. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor en el producto durante el proceso de secado.

Para el cálculo del valor de la rapidez constante de secado se debe analizar la interacción del aire de secado y el producto, a continuación se presenta un esquema de lo mencionado.

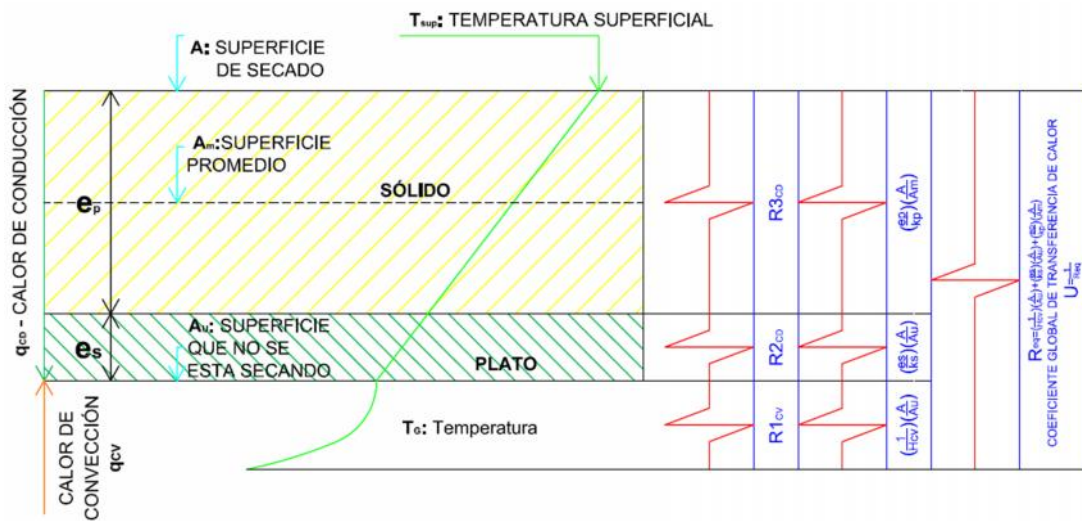


FIGURA 33. Esquema para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor del producto.

Para encontrar el valor del coeficiente global de transferencia de calor se utiliza la ecuación descrita en el apartado 4.20.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{cv} A_u} + \frac{L_s}{k_s A_u} + \frac{L_p}{k_p A_m}} \quad (4.15)$$

Para lo cual se debe encontrar el valor de las correspondientes áreas a partir del producto, las dimensiones del producto se describieron en la sección 5.1.14 y se muestran en la **FIGURA 34**.

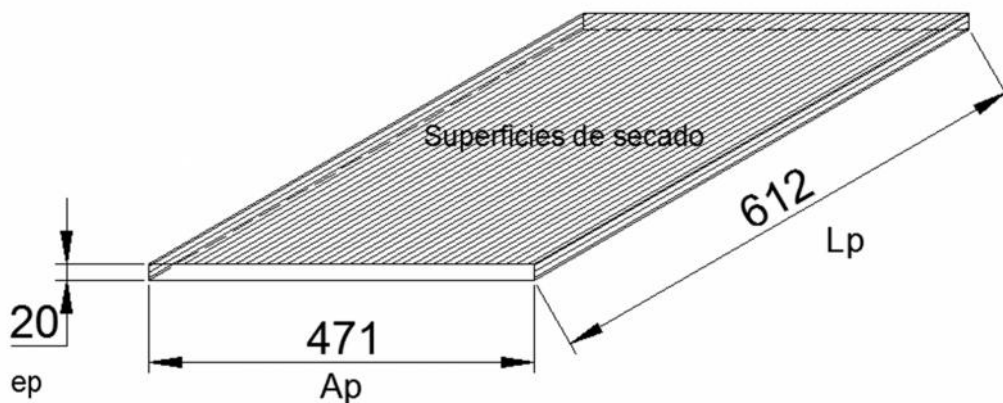


FIGURA 34. Superficies de secado.

Cálculo de la superficie de total de secado.

$$A_T := 2(e_p \cdot L_p) + 2(e_p \cdot A_p) + (L_p \cdot A_p) = 0.332 \cdot (\text{m}^2)$$

Cálculo de la superficie de total que no se está secando.

$$A_U := (L_p \cdot A_p) = 0.288 \cdot (\text{m}^2)$$

Cálculo de la superficie promedio del sólido que se está secando.

$$A_m := \frac{A_T}{2} = 0.166 \cdot (\text{m}^2)$$

Como se puede ver en la **FIGURA 33** existe una pared compuesta, la misma que está conformada por el producto (cerámica blanca) y el soporte (acero), los valores de los coeficientes de conductividad y espesores se presentan a continuación:

TABLA 6. Propiedades Termofísicas del Producto.

PROPIEDADES DE LA CERAMICA BLANCA.¹³			
Espesor	e	1.5	[cm]
Calor Especifico	Cp	750	[J/kg K]
Conductividad Térmica	K	2.2	[W/mK]
Densidad		2600	[kg/m ³]

TABLA 7. Propiedades Termofísicas del Soporte.

PROPIEDADES DEL ACERO.¹⁹			
Espesor	e	0.8	mm
Calor Específico	Cp	434	J/kg K
Conductividad Térmica	K	60.5	W/mK
Densidad		7854	kg/m ³

Reemplazando los valores en la ecuación (4.15), encontramos el valor del coeficiente global de transferencia de calor del producto.

$$U_{\text{sec}} := \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{\text{CVsec}}} \cdot \frac{A_T}{A_U}\right) + \left(\frac{e_p}{K_p} \cdot \frac{A_T}{A_m}\right) + \left(\frac{e_{\text{acp}}}{K_{\text{acp}}} \cdot \frac{A_T}{A_U}\right)} = 14.384 \cdot \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)$$

5.1.18. Cálculo de la temperatura superficial y el contenido de humedad en la superficie del producto.

Para el cálculo de la temperatura superficial y el contenido de humedad se desarrollara la igualdad siguiente.

$$K_Y w_{\text{sup}} - w_G = N_c = \frac{q_T}{h_{fg}} = \frac{(h_{\text{CV}}+U) T_G - T_{\text{sup}} + h_R T_R - T_{\text{sup}}}{h_{fg}} \quad (4.17)$$

Para las temperaturas que se maneja y el arreglo del sistema, el valor del calor por radiación es despreciable y no se considera, por otro lado el valor de h_{CV} / K_Y para el sistema aire-vapor de agua es igual a C_p ²⁰.

¹⁹ (Incropera & DeWitt, 1999, pág. 827)

²⁰ La relación de Lewis.

Por último se debe obtener el valor de la entalpia de evaporización a temperatura superficial, para poder resolver la ecuación se propone una temperatura superficial tentativa de 25[°C], cuyo valor después deberá ser comparado con el calculado y de ser el caso debera iterarse.

Para temperatura superficial tentativa $T_{\text{sup}} = 25[^\circ\text{C}]$, el valor de la entalpia es:

$$T_{\text{sec}} = 323.15 \text{ K}$$

$$h_{\text{fg}} := 2441.7 \left(\frac{10^3 \cdot \text{J}}{\text{kg}} \right)$$

Con los valores obtenidos y calculados anteriormente se procede a desarrollar la ecuación (4.17), con el objetivo de obtener la ecuación del contenido de humedad superficial en función de la temperatura superficial. Del desarrollo se obtiene lo siguiente:

$$w_{\text{sup}}(T_{\text{sup}}) := 0.04 - 0.0007T_{\text{sup}}$$

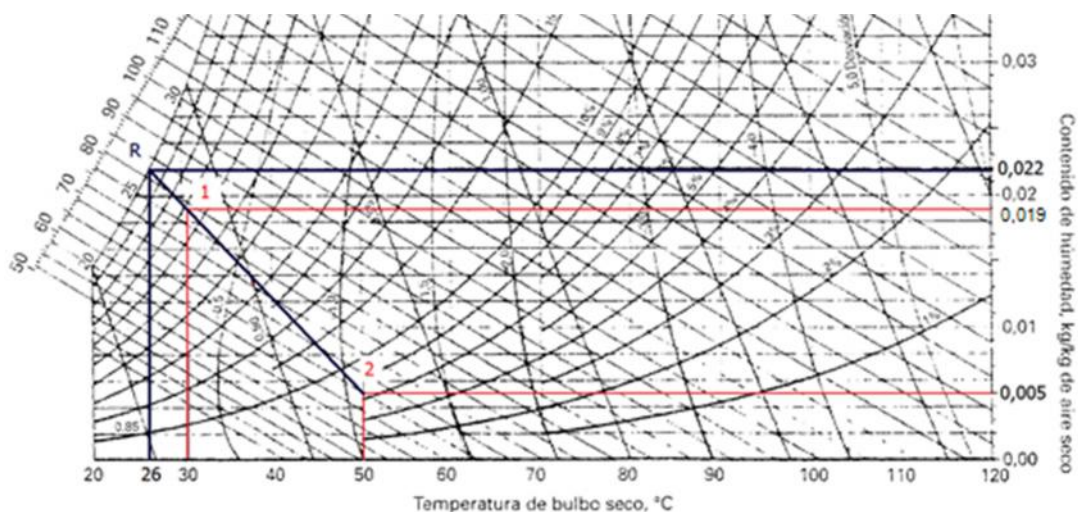
Esta es una ecuación con dos incógnitas. Sin embargo, para el sistema en particular aire-vapor de agua se mencionó en el apartado 4.20 que la utilización de las cartas psicrométricas permite su resolución.

Se dibuja la recta con dos puntos sobre la carta psicrométrica y se prolonga hasta la línea de saturación, los valores correspondientes de temperatura y humedad absoluta del punto de intersección entre la recta y la línea de saturación son la solución de la ecuación.

TABLA 8. Valores para la construcción de la recta de la ecuación $w_{sup}(T_{sup})$.

Valores para: $w_{sup}(T_{sup})= 0.04-0.0007 T_{sup}$

ORD	T_{sup} [°C]	w [kgva/kgas]
1	30	0.019
2	50	0.005

**FIGURA 35.** Resolución de la ecuación $w_{sup}(T_{sup})$ sobre la carta psicrométrica.

La solución para la ecuación se presenta en la siguiente tabla:

TABLA 9. Solución para la ecuación $w_f(T_{sup})$.

TABLA DE RESULTADOS	
T_{sup}	26 [°C]
w	0.022 [kgva/kgas]

Se compara la temperatura superficial tentativa $T_{\text{sup}}=25[^\circ\text{C}]$ con la temperatura superficial calculada $T_{\text{sup}}=26[^\circ\text{C}]$, la diferencia es de $1[^\circ\text{C}]$, que es aceptable.

Si la diferencia entre la temperatura superficial tentativa y la temperatura superficial calculada fuese de más de $5[^\circ\text{C}]$ se debería volver a realizar el cálculo pero con el valor de la entalpía de vaporización a la temperatura superficial calculada, esto quiere decir realizar iteraciones sucesivas.

El valor de la entalpía de vaporización a $T_{\text{sup}}=25[^\circ\text{C}]$ es el siguiente:

$$h_{\text{fg}} := 2441.7 \left(\frac{10^3 \cdot \text{J}}{\text{kg}} \right)$$

5.1.19. Cálculo de la rapidez o flux de secado constante N_c .

La rapidez de secado dependerá de los parámetros de operación de secado como son la velocidad del fluido y su temperatura, para este diseño se ha establecido una velocidad de aire de secado $v_a=3[\text{m/s}]$ y una temperatura de aire para el secado $T_{\text{sec}}=50[^\circ\text{C}]$, cuyos valores se encuentra dentro de los parámetros de operación²¹ para secadores directos para lotes.

Para el cálculo de la rapidez de secado constante se debe realizar un análisis del proceso de transferencia de masa y calor simultáneo entre la humedad del producto en la superficie y el aire de secado, resolviendo el lado derecho de la ecuación (4.17) con los valores anteriormente calculados se obtiene el valor de la rapidez de secado constante.

²¹ (Perry, 1994, págs. 12-53)

$$N_C := \frac{(h_{CVsec} + U_{sec}) \cdot (T_{sec} - T_{sup})}{h_{fg}} = 3.616 \times 10^{-4} \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

$$N_C = 3.616 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

5.1.20. Estimación del tiempo de secado.

Es posible estimar el tiempo de secado para un producto, siempre y cuando se conozcan los valores representativos de la **GRÁFICA 4** velocidad de secado vs contenido de humedad del producto presentada en la sección 4.18

Los valores del contenido de humedad en base seca pueden obtenerse de tablas y el valor de la rapidez de secado constante se calculó en el apartado 5.1.19. Con los cuales se puede construir una gráfica semejante a la **GRÁFICA 4**.

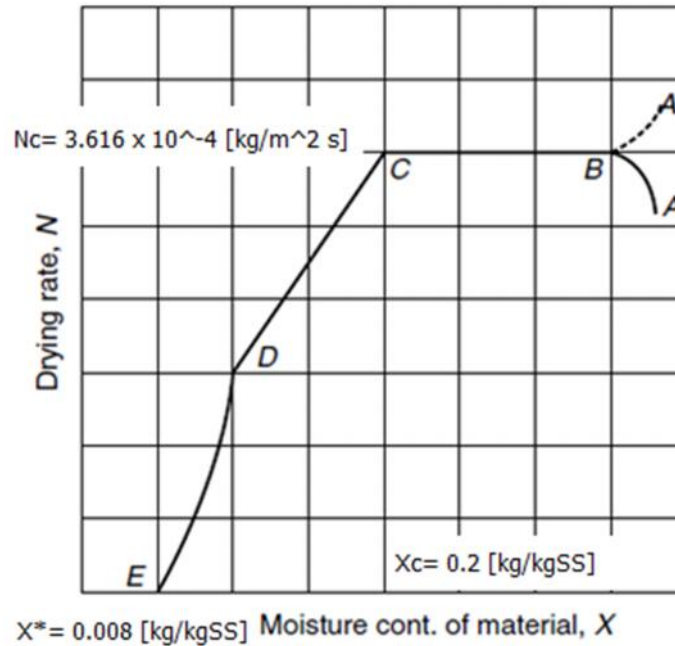
Para nuestro caso particular estos parámetros se presentan a continuación:

TABLA 10. Contenido crítico de humedad y en el equilibrio para la cerámica blanca.

CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA PUNTO CRÍTICO Y PUNTO DE EQUILIBRIO.²²			
Porcentaje de humedad crítico	X_c	0.2	kg/kgSS
Porcentaje de humedad en el equilibrio	$X_{eq}(X^*)$	0.008	kg/kgSS

²² (Perry, 1994, págs. 12-63)

Se debe considerar que la curva de secado está dividida en dos secciones: la primera una etapa en la cual la rapidez de secado permanece constante con $N=N_C$ y X_c (porcentaje de humedad crítica) y la etapa de rapidez de secado decreciente la cual limita en el valor de X_{eq} (porcentaje de humedad en el equilibrio) donde la velocidad de secado $N=0$.



GRÁFICA 6. Construcción de la Gráfica de Rapidez de Secado.

5.1.21. Estimación de tiempo de secado en el periodo de rapidez constante.

Para la estimación del tiempo de secado a condiciones de rapidez constante se utilizara la fórmula descrita en la sección 4.18.1:

$$t_{RC} = \frac{M_S(X_o - X_f)}{A N_c} \quad (4.7)$$

Reemplazando los valores tenemos lo siguiente:

$$t_{RC} := \frac{M_S (X_{iBS} - X_{cBS})}{A_T \cdot N_C} = 1.111 \cdot (\text{hr})$$

5.1.22. Estimación de tiempo de secado en el periodo de rapidez decreciente.

Para la estimación del tiempo de secado a condiciones de rapidez decreciente se utiliza la fórmula descrita en la sección 4.18.2.

$$t_{RD} = \frac{M_S(X_c - X^*)}{A N_c} \ln \frac{(X_o - X^*)}{X_f - X^*} \quad (4.12)$$

Reemplazando los valores tenemos lo siguiente:

$$t_{RD} := \frac{M_S (X_{cBS} - X_{eqBS})}{A_T \cdot N_C} \cdot \ln \frac{(X_{cBS} - X_{eqBS})}{(X_{fBS} - X_{eqBS})} = 3.191 \cdot (\text{hr})$$

5.1.23. Estimación de tiempo total de secado.

El tiempo total de secado no es más que la suma del tiempo de secado en el periodo de rapidez constante y el tiempo de secado en el periodo de rapidez decreciente como se mencionó en la sección 4.18.3.

$$t_T = t_{RC} + t_{RD} \quad (4.13)$$

Remplazando los valores obtenidos en las secciones 5.1.21 y 5.1.22, tenemos:

$$t_T := t_{RC} + t_{RD} = 4.302 \cdot (\text{hr})$$

5.1.24. Calor necesario para el secado.

Es necesario establecer cuál es la cantidad de energía necesaria para el secado del producto, el calor necesario para el secado está constituido principalmente por:

- El calor útil (calor que necesita el producto).l
- Las pérdidas de calor (calores que se propagan al ambiente).

5.1.25. Calor útil del producto.

El calor útil está constituido por:

- Calor sensible del producto
- Calor sensible de agua.
- Calor latente del agua.
- Calor sensible del soporte.

5.1.26. Calor sensible del producto.

El cálculo del calor sensible del producto se calcula mediante la ecuación descrita en la sección 3.6.2:

$$Q_S = M C_p \Delta T \quad (3.18)$$

La masa del producto corresponde a la masa seca $M_S = 9.6[\text{kg}]$ calculado en la sección 5.1.3 y el valor del calor específico es de $C_p = 750 [\text{J/kg K}]$ descrito en la **TABLA 6**.

La variación de temperatura ΔT viene dada por la diferencia entre la temperatura de secado $T_{\text{sec}} = 50[^\circ\text{C}]$ descrita en la **TABLA 5** y la temperatura superficial $T_{\text{sup}} = 26[^\circ\text{C}]$ descrita en la **TABLA 9**.

Reemplazando tenemos:

$$q_{Sp} := M_S \cdot C_{p_p} \cdot (T_{\text{sec}} - T_{\text{sup}}) = 1.728 \times 10^5 \cdot (\text{J})$$

5.1.27. Calor sensible del agua.

El cálculo del calor sensible del agua que se va a retirar del producto se calcula mediante la ecuación descrita en la sección 3.6.2:

$$Q_S = M C_p \Delta T \quad (3.18)$$

El valor del contenido de humedad (agua) que se va a remover es de $\Delta M_{ag}=1.451[\text{kg}]$ calculado en la sección 5.1.7. El valor del calor específico del agua es $C_p^{23}=1.882[\text{kJ/kg K}]$ evaluada a temperatura media $T_{med} = 311[^\circ\text{K}]$ calculada con los valores de T_{sec} y T_{sup} .

Reemplazando tenemos:

$$q_{Sag} := \Delta M_{ag} \cdot C_{p_{ag}} \cdot (T_{sec} - T_{sup}) = 6.552 \times 10^4 \cdot (\text{J})$$

5.1.28. Cálculo del calor latente del agua.

Para el cálculo del calor latente del agua se utiliza la ecuación descrita en la sección 3.6.1:

$$Q_L = M h \quad (3.17)$$

El valor del contenido de humedad (agua) que se va a remover es de $\Delta M_{ag}=1.451[\text{kg}]$ calculado en la sección 5.1.7. El valor de la entalpía de evaporización a temperatura media $T_m=311[\text{K}]$ es $h_{fg}^{23} = 2414 [\text{kJ/kg}]$.

Reemplazando Tenemos:

$$q_{Lag} := \Delta M_{ag} \cdot h_{fg_{ag}} = 3.502 \times 10^6 \cdot (\text{J})$$

²³ (Incropera & DeWitt, 1999, pág. 846)

5.1.29. Calor sensible del soporte.

El cálculo del calor sensible del soporte de acero se calcula mediante la ecuación descrita en la sección 3.6.2:

$$Q_S = M C_p \Delta T \quad (3.18):$$

Se propone una bandeja con las siguientes dimensiones.

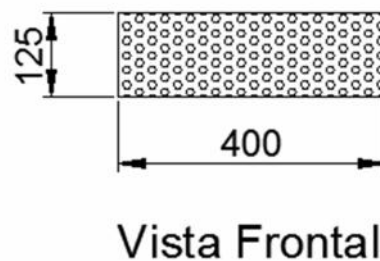
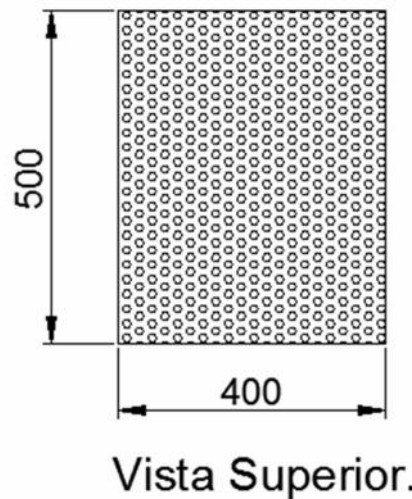


FIGURA 36. Dimensionamiento del soporte.

El soporte es de una plancha perforada de acero de espesor $e=0.8$ [mm], con los valores del espesor, dimensiones de la **TABLA 11** y el valor de la

densidad del acero $\rho_{\text{acp}} = 7854 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ descrita en la **TABLA 7** se puede encontrar la masa de soporte.

TABLA 11. Dimensiones del soporte.

DIMENSIONES DEL SOPORTE			
Longitud	L	0,5	[m]
Ancho	A	0,4	[m]
Altura	H	0,125	[m]
Espesor	e	0,08	[m]

Calculamos el volumen

$$V_{\text{acp}} := [(0,4\text{m} \cdot 0,5\text{m}) + 2 \cdot (0,125\text{m} \cdot 0,5\text{m}) + 2(0,125\text{m} \cdot 0,4\text{m})] \cdot (0,8\text{mm}) \cdot (0,75) = 2,55 \times 10^{-4} \cdot (\text{m}^3)$$

Calculamos la masa del soporte.

$$M_{\text{acp}} := \rho_{\text{acp}} \cdot V_{\text{acp}} = 2,003 \cdot (\text{kg})$$

El valor del calor específico del acero descrito en la **TABLA 7** es $C_p = 434 \text{ [J/kgK]}$ y la diferencia de temperatura se calcula a partir de la temperatura de secado $T_{\text{sec}} = 50 \text{ [}^\circ\text{C]}$ descrita en la **TABLA 5** y la temperatura superficial $T_{\text{sup}} = 26 \text{ [}^\circ\text{C]}$ descrita en la **TABLA 9**.

Reemplazando tenemos:

$$q_{\text{Sacp}} := M_{\text{acp}} \cdot C_{p\text{acp}} \cdot (T_{\text{sec}} - T_{\text{sup}}) = 2,086 \times 10^4 \text{ (J)}$$

5.1.30. Cálculo del calor útil.

El calor útil es la suma los calores que necesita el producto: calor sensible del agua calculado en la sección 5.1.27 , calor latente del agua calculado en la sección 5.1.28, calor sensible del sólido seco del producto calculado en la sección 5.1.26 y calor sensible del soporte calculado en la sección 5.1.29 , y dividiendo a este valor para el tiempo de secado $t_T=4.302[\text{hr}]$ calculado en la sección 5.1.23. Reemplazando valores tenemos lo siguiente:

$$q_U := \frac{q_{Sp} + q_{Sag} + q_{Lag} + q_{SACP}}{t_T} = 242.828 \cdot (\text{W})$$

5.1.31. Pérdidas de calor al ambiente.

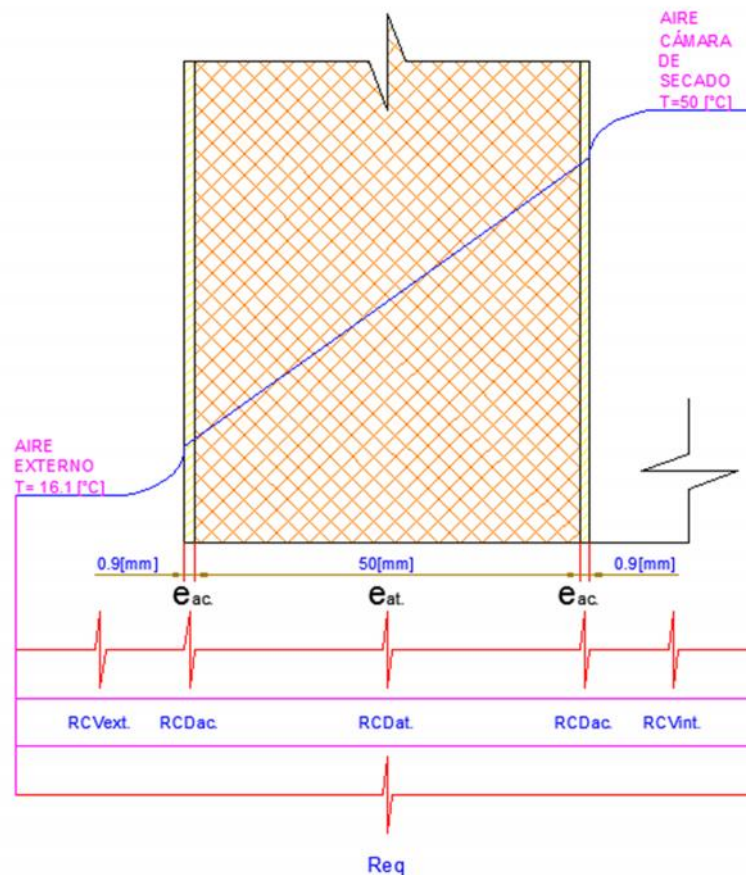


FIGURA 37. Esquema de las resistencias térmicas del sistema.

Las pérdidas de calor están constituidas por la cantidad de calor que se propaga por las paredes de la cámara de secado al ambiente externo, en la **FIGURA 37** se muestra el diagrama de la pared compuesta para las pérdidas de calor.

Se puede ver que el sistema cuenta con pérdidas de transferencia de calor por convección interna a condiciones de secado $T_{\text{sec}}= 50[^\circ\text{C}]$ y $v_a=[3\text{m/s}]$, y externa a condiciones ambiente.

Las paredes están conformadas por un sandwich constituido por láminas de acero de tol negro de $0.9[\text{mm}]$ de espesor en sus extremos, mientras que el interior se sitúa aislante térmico (plancha de lana de roca) de espesor de $5[\text{cm}]$.

Para el cálculo de las pérdidas se debe calcular el coeficiente global de transferencia de calor en la pared compuesta por ende el valor de la resistencia equivalente total del sistema y el valor de cada una de las áreas de las paredes que forman la cámara de secado.

5.1.32. Cálculo del coeficiente de convección externo.

Para el cálculo del coeficiente de convección externo, tomaremos la ecuación de Watmuff (1977) que permite el cálculo del coeficiente de convección en función de la velocidad del aire teniendo para velocidad de aire en Quito $v_{\text{aext}}^{24}= 0.639[\text{m/s}]$ teniendo lo siguiente:

$$h_{cv_{\text{aext}}} := 2.8 + 3 \cdot 0.639$$

$$h_{CV_{\text{aext}}} := 4.72 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)$$

²⁴. (-INAMHI-, 2010, pág. M024)

5.1.33. Cálculo del coeficiente de convección interno.

Para el cálculo del coeficiente de convección del aire dentro de la cámara de secado se utiliza la ecuación general para flujo completamente desarrollado turbulento, para lo cual debemos calcular primero el valor de número de Nusselt.

$$Nu_{\phi} = 0.023 \cdot Re_{cs}^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^n$$

Para el cálculo de número de Nusselt primero debemos calcular el número de Reynold con la ecuación descrita en el apartado 4.20 teniendo lo siguiente:

$$Re = \frac{\phi_{eq}G}{\mu} \quad (4.20)$$

La velocidad del aire es parámetro de diseño y se estableció en el apartado 5.1.13 un valor de $v_{sec}=3[m/s]$ y las propiedades termofísicas del aire se calculan a temperatura media descrita en el apartado 5.1.27 $T_{med}=311[{}^{\circ}K]$. Los valores se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 12. Cuadro de los valores de las interpolaciones de las propiedades termofísicas del aire a $T_m=311[{}^{\circ}K]$.

PROIEDADES TERMOFÍSICAS A TEMPERATURA MEDIA ²⁵					
T [°K]	[kg/m ³]	Cp[kJ/kg]	$\mu 10^{-7}[N.s/m^2]$	k $10^{-3}[W/Mk]$	Pr
300	1,1614	1,007	184,6	26,3	0,707
311	1,1248	1,00744	189,792	27,114	0,70546
350	0,9950	1,009	208,2	30	0,7

El diámetro equivalente se calcula a partir de las dimensiones de la cámara de secado con la ecuación descrita en el apartado 4.20, tomando en consideración la dirección el movimiento del aire.

²⁵ (Incropera & DeWitt, 1999, pág. 839)

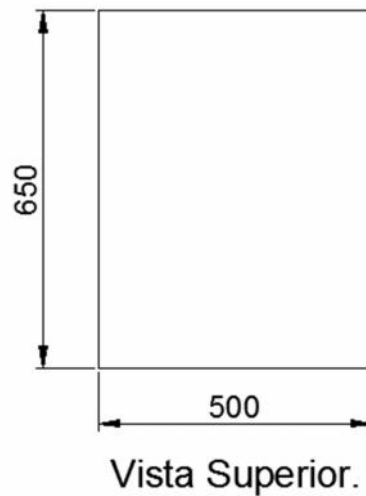


FIGURA 38. Dimensiones de la vista superior de la cámara de secado para el cálculo del diámetro equivalente.

$$\phi_{eq} = \frac{1.30 (ab)^{0.625}}{(a+b)^{0.25}} \quad (4.23)$$

Reemplazando tenemos:

$$\phi_{eq} := \frac{1.3 \cdot (L_{cs} \cdot A_{cs})^{\frac{5}{8}}}{(L_{cs} + A_{cs})^{\frac{1}{4}}} = 0.622 \text{ (m)}$$

Reemplazamos los valores de la **TABLA 12** y el valor del correspondiente diámetro equivalente y calculamos el valor del número de Reynolds.

$$Re_a := \frac{\rho_a \cdot v_{sec} \cdot \phi_{eq}}{\mu_a} = 1.106 \times 10^5$$

Con el número de Reynold en régimen turbulento y el número de Prandtl se puede calcular el número de Nusselt tomando en cuenta que el valor de la constante $n=0.3^{26}$ para enfriamiento, reemplazando tenemos:

²⁶ (Incropera & DeWitt, 1999, pág. 460)

$$N_a := 0.023 \cdot Re_a^{\frac{4}{5}} \cdot Pr_a^n = 224.515$$

A continuación se calcula el valor del coeficiente de convección interno h_{CVaint} a partir de la relación entre el número de Nusselt, reemplazando el valor de la conductividad térmica del aire K de la **TABLA 12**, el valor del diámetro equivalente ϕ_{eq} , tenemos:

$$h_{CVaint} := \frac{N_a \cdot K_a}{\phi_{eq}} = 9.784 \cdot \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

5.1.34. Cálculo de las resistencias térmicas del sistema.

El valor de las resistencias se calcula en base al tipo de transferencia de calor y es necesario para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

5.1.35. Cálculo de la resistencia térmica por convección interna.

Para el cálculo de la resistencia térmica por convección interna se utiliza la ecuación descrita en el apartado 3.8.2.

$$R_{CV} \equiv \frac{T_{sup} - T_{fl}}{\frac{q}{A}} = \frac{1}{h} \quad (3.25)$$

Reemplazando el valor de coeficiente de transferencia de calor por convección $h_{CVaint} = 9.784 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ calculado en el apartado 5.1.33 tenemos:

$$R_{CVaint} := \frac{1}{h_{CVaint}} = 0.102 \cdot \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$$

5.1.36. Cálculo de la resistencia térmica por convección externa.

Para el cálculo de la resistencia térmica por convección externa se utiliza la ecuación descrita en el apartado 3.8.2.

$$R_{CV} \equiv \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{fl}}}{\frac{q}{A}} = \frac{1}{h} \quad (3.25)$$

Reemplazando el valor de coeficiente de transferencia de calor por convección $h_{CV_{\text{ext}}} = 4.72 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ calculado en el apartado 5.1.32 tenemos:

$$R_{CV_{\text{aext}}} := \frac{1}{h_{CV_{\text{aext}}}} = 0.212 \cdot \left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right)$$

5.1.37. Cálculo de la resistencia térmica por conducción de la pared de acero.

Para el cálculo de la resistencia térmica por conducción de la pared de acero se utiliza la ecuación descrita en el apartado 3.8.1.

$$R_{CD} \equiv \frac{T_1 - T_2}{\frac{q_x}{A}} = \frac{L}{k} \quad (3.24)$$

El espesor de la pared de acero $e_{\text{ac}} = 0.9 \text{ [mm]}$ se describió en el apartado 5.1.31 y el valor del coeficiente de conductividad térmica para el acero $k_{\text{ac}} = 60.5 \text{ [W/m}^0\text{K]}$ Se describió en la **TABLA 7**

Reemplazando tenemos:

$$R_{CD_{\text{ac}}} := \frac{e_{\text{ac}}}{K_{\text{ac}}} = 1.488 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right)$$

5.1.38. Cálculo de la resistencia térmica por conducción del aislante térmico.

Para el cálculo de la resistencia térmica por conducción del aislante térmico se utiliza la ecuación descrita en el apartado 3.8.1.

$$R_{CD} \equiv \frac{T_1 - T_2}{\frac{q_x}{A}} = \frac{L}{k} \quad (3.24)$$

El espesor del aislante térmico (lana de roca) es de $e_{at}^{27} = 5[\text{cm}]$ y el valor del coeficiente de conductividad térmica para la lana de roca es $k_{ac}^{27} = 0.04[\text{W}/\text{m}^0\text{K}]$. Reemplazando tenemos:

$$R_{CDat} := \frac{e_{at}}{K_{at}} = 1.25 \cdot \left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right)$$

5.1.39. Cálculo de la resistencia equivalente del sistema.

Con el valor de cada una de las resistencias se procede a calcular la resistencia equivalente del sistema que se mostró de manera esquemática en la **FIGURA 37**. Esquema de las resistencias térmicas del sistema

La resistencia equivalente del sistema se calcula mediante la ecuación que se describió en la sección 3.8.4 ya que el arreglo de pared es en serie.

$$R_{eq} = \frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{1}{h_2} \quad (3.27)$$

Reemplazando los valores de: la resistencia convectiva interna calculada en el apartado 5.1.35, la resistencia convectiva externa calculada en el apartado 5.1.36, la resistencia conductiva de la pared de acero calculada en

²⁷ Valor obtenido de las características del catálogo de la Rockwool Firesave Insulation .

el apartado 5.1.37 y la resistencia conductiva del aislante térmico lana de roca calculada en el apartado 5.1.38, tenemos:

$$R_{eq} := R_{CVaext} + R_{CDac} + R_{CDat} + R_{CDac} + R_{CVaint} = 1.564 \left(\frac{m^2 K}{W} \right)$$

5.1.40. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para las pérdidas de calor.

El valor del coeficiente global de transferencia de calor se calcula mediante la ecuación descrita en la sección 3.8.5.

$$U = \frac{1}{R_{eq}} \quad (3.28)$$

Reemplazando el valor de la resistencia equivalente $R_{eq} = 1.564 [m^2 K/W]$ calculado en el apartado 5.1.39 tenemos:

$$U := \frac{1}{R_{eq}} = 0.639 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

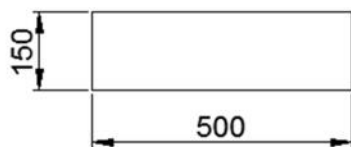
5.1.41. Cálculo de las áreas de las paredes del secador.

Para el cálculo posterior de valor de las pérdidas de calor al ambiente es necesario conocer las áreas por donde el calor tratara de disiparse al ambiente, incluyendo la cámara de secado.

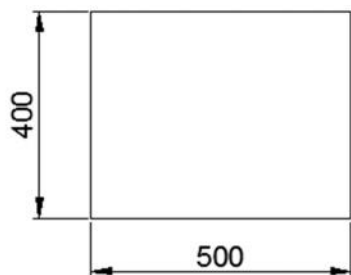
5.1.42. Dimensionamiento de la cámara de acondicionamiento.

Para el desarrollo del secador se propone que el ingreso aire deba ser por la parte inferior y después suba, estos son los parámetros que definen el diseño de la cámara de secado, en secadores comunes el ingreso es lateral o inferior dejando grandes espacios huecos, sin embargo se ha pensado que

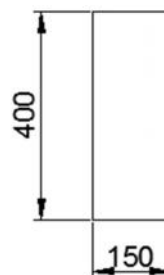
en mejora del diseño se puede proponer un sección para el ingreso del aire donde también se encuentre la resistencia eléctrica que generara el calor para el acondicionamiento del aire. Proponiendo lo siguiente:



Vista Superior.



Vista Frontal.



Vista Lateral
Derecha.

FIGURA 39. Esquema y dimensionamiento de la cámara de acondicionamiento.

Al juntar la cámara de secado y la cámara de acondicionamiento se podrá calcular las áreas para el cálculo de las pérdidas. En la **FIGURA 40** se muestra un esquema isométrico.

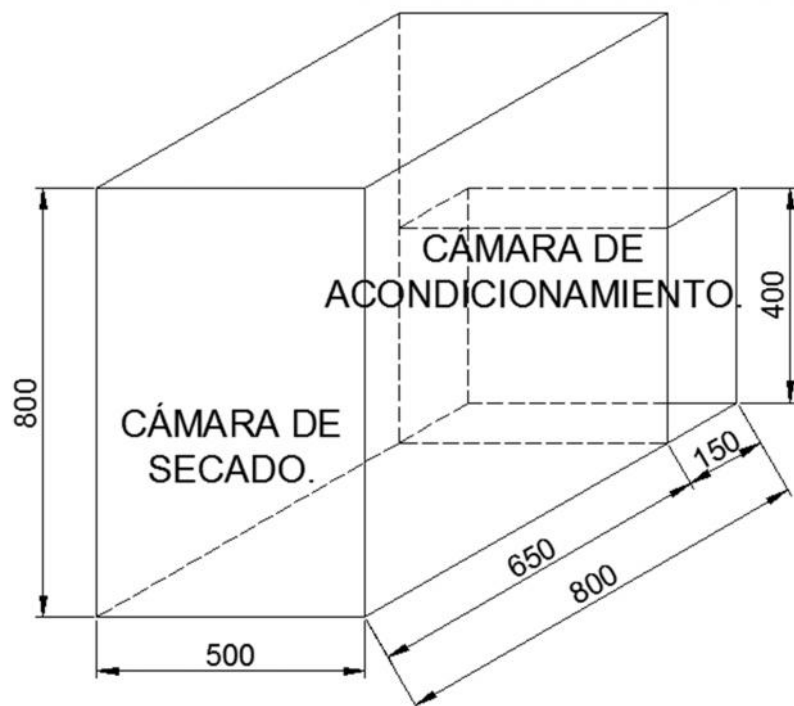


FIGURA 40. Esquema del secador.

Incluye dimensiones de la cámara de secado y acondicionamiento.

Las dimensiones interiores del secador se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 13. Dimensiones interiores del conjunto cámara de secado y cámara de acondicionamiento del secador.

DIMENSIONES INTERIORES DEL SECADOR.			
		CAMARA DE SECADO	CAMARA DE ACONDICIONAMIENTO
L	[mm]	650	150
A	[mm]	500	500
H	[mm]	800	400

5.1.43. Área Frontal.

Para el cálculo del área frontal, los valores se tomaran de la **TABLA 13** y se podrán verificar en la **FIGURA 40**.

$$A_F := A_{CS} \cdot H_{CS} = 0.4 \cdot (\text{m}^2)$$

5.1.44. Área Posterior.

Para el cálculo del área posterior, los valores se tomaran de la **¡Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** y se podrán verificar mediante la **FIGURA 40**.

$$A_P := A_{CS} \cdot H_{CS} = 0.4 \cdot (\text{m}^2)$$

5.1.45. Área Superior.

Para el cálculo del área superior, los valores se tomaran de la **TABLA 13** y se podrán verificar mediante la **FIGURA 40**.

$$A_S := (L_{CS} + L_{ca}) \cdot (A_{CS}) = 0.4 \cdot (\text{m}^2)$$

5.1.46. Área Inferior.

Para el cálculo del área inferior, los valores se tomaran de la **TABLA 13** y se podrán verificar mediante la **FIGURA 40**.

$$A_I := (L_{CS} + L_{ca}) \cdot (A_{ca}) = 0.4 \cdot (\text{m}^2)$$

5.1.47. Área Lateral Derecha.

Para el cálculo del área lateral derecha, los valores se tomaran de la **TABLA 13** y se podrán verificar mediante la **FIGURA 40**.

$$A_{LD} := (H_{cs} \cdot L_{cs}) + (H_{ca} \cdot L_{ca}) = 0.58 \cdot (\text{m}^2)$$

5.1.48. Área Lateral Izquierda.

Para el cálculo del área lateral izquierda, los valores se tomaran de la **TABLA 13** y se podrán verificar mediante la **FIGURA 40**.

$$A_{LI} := (H_{cs} \cdot L_{cs}) + (H_{ca} \cdot L_{ca}) = 0.58 \cdot (\text{m}^2)$$

5.1.49. Área total.

El área total para el cálculo de las pérdidas no es más que la suma del área frontal calculada en la sección 5.1.43, del área posterior calculada en la sección 5.1.44, del área superior calculada en la sección 5.1.45, del área inferior calculada en la sección 5.1.46, del área lateral derecha calculada en la sección 5.1.46 y del área lateral izquierda calculada en la sección 5.1.48, teniendo lo siguiente:

$$A_{TC} := A_F + A_P + A_S + A_I + A_{LD} + A_{LI} = 2.76 (\text{m}^2)$$

5.1.50. Cálculo de las pérdidas de calor al ambiente.

Para el cálculo de las pérdidas de calor se reemplaza los valores en la ecuación que se describió en el apartado 3.8.6, teniendo lo siguiente:

$$q = U A \Delta T \quad (3.29)$$

Reemplazando los valores del coeficiente global de transferencia de calor $U = 0.639[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ calculado en el apartado 5.1.40, el valor total del área de la sección transversal en dirección normal al flujo de calor $A = 2.76[\text{m}^2]$ calculado en la sección 5.1.49 y del diferencial de temperatura entre la temperatura de secado $T_{\text{sec}} = 50[^\circ\text{C}]$ de la **TABLA 5** y de la temperatura ambiente $T_{\text{amb}} = 16.1[^\circ\text{C}]$ de la **TABLA 4**, tenemos:

$$q_P := U \cdot A_{TC} \cdot (T_{\text{sec}} - T_{\text{amb}}) = 59.82 \cdot (\text{W})$$

5.1.51. Cálculo del calor necesario para el sistema.

Para el cálculo del calor necesario se debe sumar el calor de las pérdidas calculado en el apartado 5.1.50 y el calor útil calculado en 5.1.30, teniendo lo siguiente:

$$q_N := q_{PT} + q_U = 302.648 \cdot (\text{W})$$

$$\%q_{PT} := \frac{q_{PT}}{q_N} = 0.198$$

$$\%q_U := \frac{q_U}{q_N} = 0.802$$

5.1.52. Cálculo de la tasa de aire necesaria para el secado.

Para el cálculo de la cantidad necesaria de aire se realiza un balance de energía entre el calor que pierde aire que es un calor sensible y el calor necesario para el secado.

El valor de la temperatura media $T_m = 38[^\circ\text{C}]$ se calculó en la sección 5.1.27, calor total necesario $q_T = 302.649[\text{W}]$ se calculó en la sección 5.1.51, y el valor de $C_p = 1.005 [\text{kJ}/\text{kg K}]$ se describió en la sección 5.1.12.

Para el cálculo de la masa proponemos un factor de seguridad FS=1.2 teniendo lo siguiente:

$$M_a := \frac{FS \cdot q_N}{C_p \cdot (T_{sec} - T_m)} = 0.03 \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

5.1.53. Cálculo del caudal necesario.

Se calcula el valor del caudal necesario, con el valor de la densidad para el aire a condiciones ambientales calculado a partir del valor del volumen específico de la **TABLA 4** teniendo $\rho_a = 0.887 \text{ kg/m}^3$.

$$Q := \frac{M_a}{\rho_{amb}} = 0.034 \cdot \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

5.1.54. Selección del ventilador.

Una vez calculado el caudal de aire necesario en el apartado 5.1.53 se debe seleccionar un ventilador en el mercado que permita obtener el caudal necesario para el secado, para esto se mira en los catálogos de los fabricantes y las disponibilidades en el mercado.

Para la selección de un ventilador es necesario comparar las especificaciones técnicas con las necesidades de nuestro diseño. Cabe recalcar que para una correcta selección hay que hacer el cálculo de las pérdidas de presión²⁸ los cuales son de dos tipos:

- Las pérdidas por fricción las cuales dependen la longitud del ducto y de las características propias del material y se calcula mediante la ecuación de Darcy o se pueden obtener mediante gráficas²⁹.

²⁸ (Mott, 2006, pág. 570)

²⁹ (ASHRAE, 2009, págs. 21.6-21.8)

- Las pérdidas dinámicas del aire debido a los accesorios para el control de flujo y acoplamientos se estiman con los valores publicados de coeficientes de pérdida los cuales se encuentran tabulados para cada tipo de accesorio en normas³⁰ o es un valor que te lo ofrece el fabricante.

Sin embargo, para nuestro caso particular la longitud de ducto es muy pequeña como para generar pérdidas considerables al igual que el número de accesorios que son limitados por lo que las pérdidas son despreciables.

De nuestro cálculo de obtuvo que se necesita un caudal de $0.034\text{m}^3/\text{s}$, del catálogo Soler Palau Gama HABITAD se encontró que modelo TD350-125 tiene una salida de caudal en la boca de $0.07\text{m}^3/\text{s}$ con un diámetro de ducto de 125[mm] el cual cumple con los requerimientos. Las características completas del ventilador se describen en la sección de ANEXOS.



FIGURA 41. Ventilador Soler Palau TD 350/125.

³⁰ (ASHRAE, 2009, págs. 21.26-21.67)

5.1.55. Cálculo de la potencia necesaria para el acondicionamiento.

Para el cálculo de la cantidad de energía necesaria para acondicionar el aire realizamos un balance de energía entre los estados: 1 (aire a temperatura ambiente $T_{amb}= 16.1[^\circ\text{C}]$) de la **TABLA 4** y 2 (aire a temperatura de diseño T_d).

Definimos a la temperatura de diseño como la temperatura de secado T_{sec} por un factor de seguridad $FS=1.2$, teniendo lo siguiente

$$T_d := 60(^\circ\text{C}) = 333.15 \cdot (\text{K})$$

Como se describió en el apartado 3.5 el proceso de acondicionamiento para esta aplicación es un proceso de calentamiento simple, realizando el balance de energía que se describió en la sección 3.5.2 tenemos:

$$Q_{12} = M_{as} (h_2 - h_1) \quad (3.16)$$

El valor de la masa de aire $M_a=0.03[\text{kg/s}]$ para el secado se calculó en el apartado 5.1.52, el valor de la entalpia $h_1= 21.41 [\text{KJ/Kgas}]$ evaluada a temperatura ambiente se obtuvo mediante software EES (Engineering Equation Solver) en el apartado 5.1.8 y se describe en la **TABLA 4**.

Para obtener el valor de la entalpia en el estado 2 hay que evaluar y encontrar las características del aire a temperatura de diseño $T_d=60[^\circ\text{C}]$ considerando que la presión permanece constante en $P_{atm}=73.9 [\text{kPa}]$.

Como se mencionó anteriormente en el proceso de acondicionamiento de aire (calentamiento simple) el valor de la humedad absoluta permanece constante por lo tanto el valor de la humedad absoluta $w_1= 0.002055 [\text{Kgva/Kgas}]$ calculada en el apartado 5.1.8 y se describe en la **TABLA 4** permanece constante en el proceso.

Con estos parámetros se utiliza el software EES (Engineering Equation Solver) para encontrar el valor de los parámetros restantes. Tenemos los siguientes resultados:

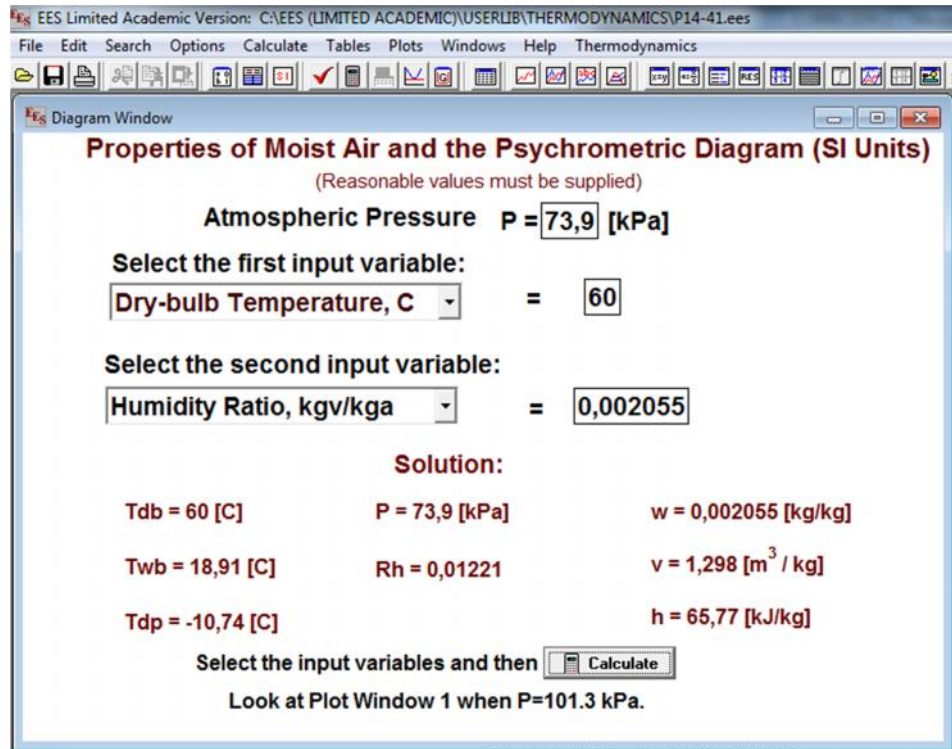


FIGURA 42. Propiedades psicrométricas del aire a T_d y P_{atm} . (Software EES)

Para:

$$T_d := 60^\circ\text{C} = 333.15 \text{ K}$$

$$P_Q = 7.397 \times 10^4 \cdot (\text{Pa})$$

$$w_d := w_{amb} = 2.055 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 14. Propiedades Psicrométricas del Aire a T_d y P_{atm} .

Aire a Temperatura de Diseño.		
P_{atm}	73.9	[kPa]
T_{Bs}	60	[°C]
w	0.002055	[kgva/kgas]
HR	1.221	[%]
v	1.298	[kg/m ³]
h	65.77	[kJ/kgas]

A continuación se presenta el diagrama psicrométrico de acondicionamiento:

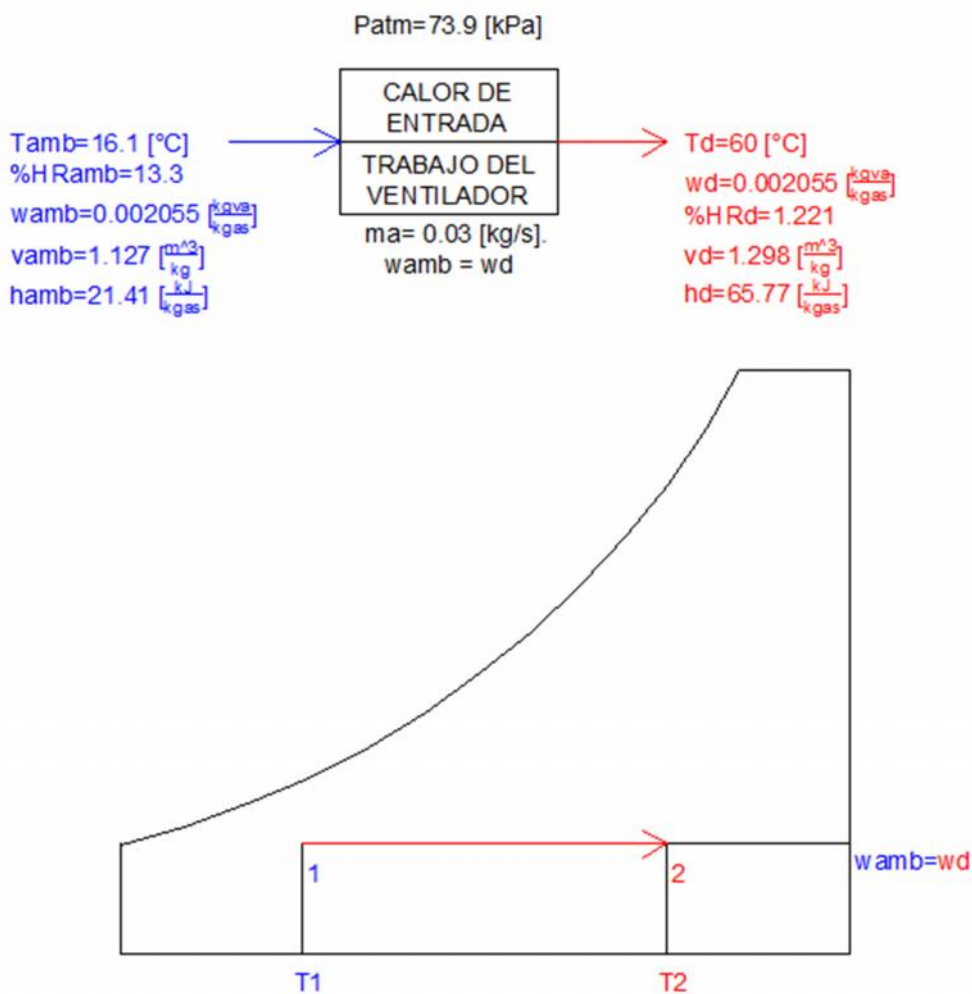


FIGURA 43. Diagrama del proceso de acondicionamiento del aire sobre la carta psicrométrica ($T_{amb} - T_d$).

Incluyendo en el cálculo el factor de seguridad $FS=1.2$ que se describió en el apartado 5.1.52 y reemplazando los valores descritos anteriormente tenemos

$$q_c := FS \cdot M_a \cdot (h_d - h_{amb}) = 1.603 \times 10^3 \text{ W}$$

Con este valor se mandó a diseñar una resistencia que trabaje con una fuente de 120[V] el diseño estuvo a cargo de Electrochromo S.A. ubicado en el centro histórico de Quito.

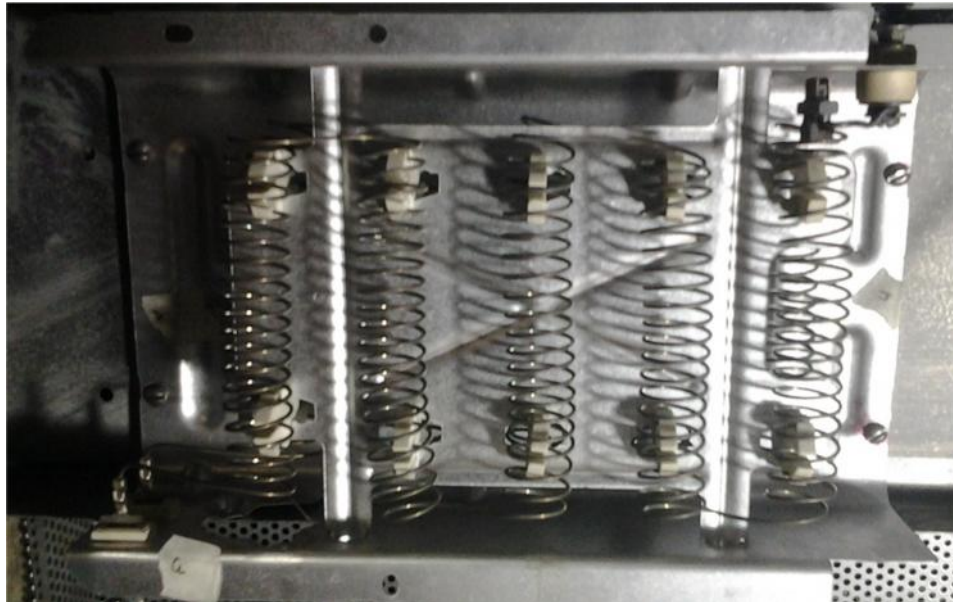


FIGURA 44. Resistencia de espiral Niquel-Cromo. (Electrochromo S.A.)

5.2. CONSTRUCCIÓN.

La etapa de construcción describe el proceso de manufactura de las partes y su posterior ensamblaje, el presente apartado está dividido en dos secciones fundamentales: la parte mecánica y la parte eléctrica.

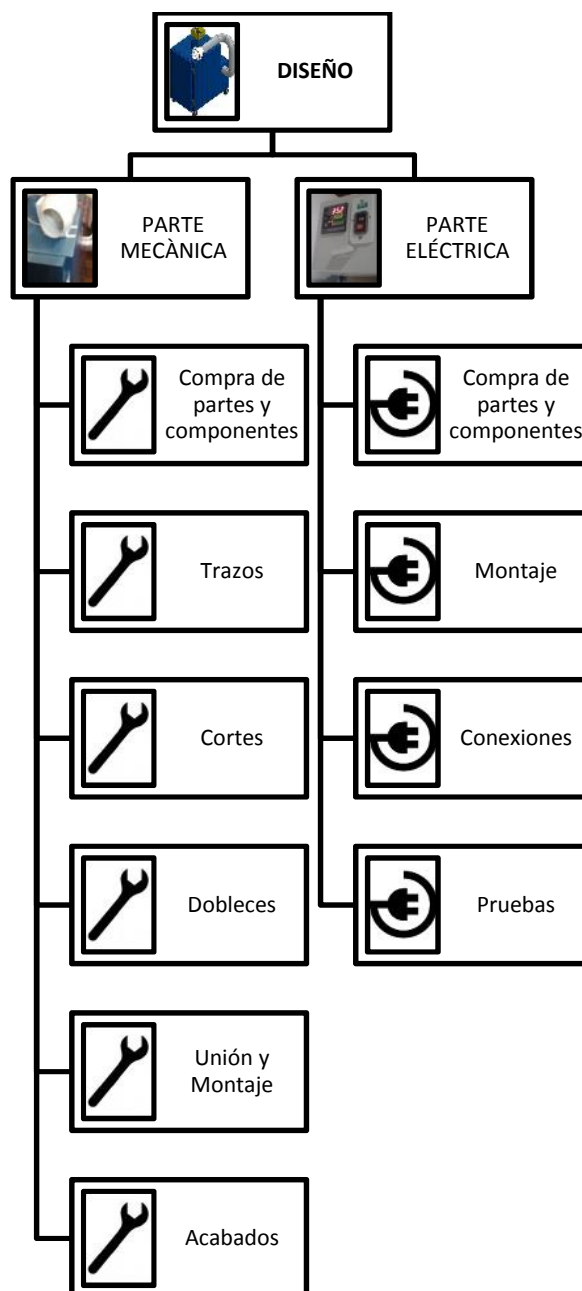


FIGURA 45. Etapas de Construcción.

5.2.1. Parte Mecánica.

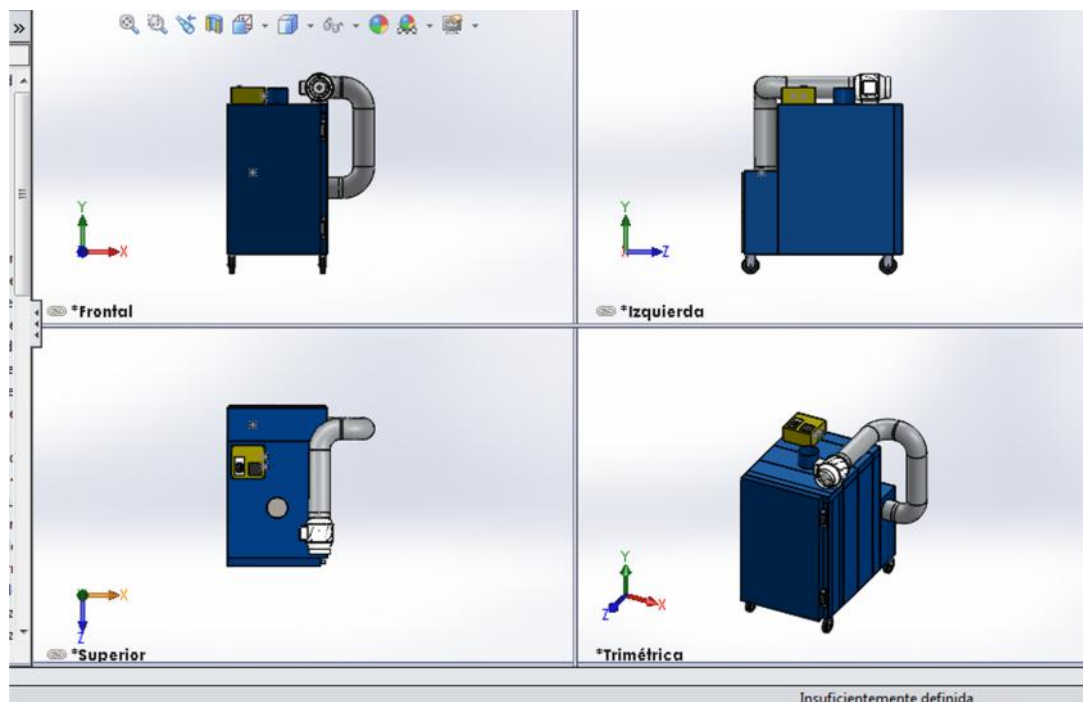


FIGURA 46. Ensamble secador en Software de CAD/CAM (Vistas e Isometría).

Como se describió en la etapa de diseño, el secador está compuesto principalmente por dos cámaras: una cámara de secado y una cámara de acondicionamiento. Ambas cámaras se encuentran conectadas para formar el secador.

En el caso de la cámara de secado, esta contiene una puerta de acceso por donde ingresan las piezas de cerámica, mientras que la cámara de acondicionamiento contiene una tapa sujeta con pernos.

Ambas cámaras al igual que la puerta deben poseer un recubrimiento de aislante térmico el cual fue descrito en la etapa de diseño, esto quiere decir formar un arreglo de tipo sandwich para evitar las pérdidas de calor al ambiente. El sandwich está compuesto por dos caras externas de material de Tool negro de 0.9[mm] de espesor y con una placa de aislante térmico lana de roca de 5[cm] de espesor.

Adicionalmente se colocó una estructura interna de tool negro de 0.9mm de espesor en las caras laterales y principalmente la parte inferior con el objetivo de dar rigidez y resistencia al sistema. Con el fin de poder transportar el secador con facilidad se instalaron cuatro ruedas dos locas y dos fijas en la parte de la base

Las dimensiones se calcularon y verificaron en la sección de diseño de este capítulo durante todo el apartado 5.1.1 de ahí que antes de realizar la construcción de las partes por separado se levantó el sólido en el software de diseño Software de CAD/CAM **FIGURA 46**. Los correspondientes planos de cada una de las partes al igual que sus indicaciones constructivas se describen detalladamente en la sección de ANEXOS (Planos) de este trabajo.

El proceso de construcción se llevó a cabo en metalmecánica Orellana ubicado en el sector de Chillogallo, lugar que posee la infraestructura necesaria para realizar los trabajos de construcción como son: trazado, doblado, cortado y por último soldado.

A continuación se detalla la lista de materiales necesarios para la construcción de la parte mecánica del secador con sus respectivos costos y cantidades; y posteriormente se describirá el proceso de construcción mecánica de las partes y su posterior ensamble:

TABLA 15. Descripción de Materiales Construcción Mecánica.

MATERIALES PARTE MECÁNICA				
ORD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Empaque Puerta Frigorífica 1"X1/2"X52ft	1	19,94	19,94
2	Plancha De Tool Negro 0.9mm	4	19,48	77,92
3	Rueda Fija	2	2,50	5
4	Rueda Giratoria	2	3,00	6
5	Mango De Puerta	1	2,50	2,5
6	Bisagra Vitrina Frigorífica 5"	2	8,00	16
7	Lamina Perforada Hierro 0.8mm R3t5	1	33,00	33
8	Ducto Flexible De Aluminio Diam 5" X 12ft	1	24,78	24,78
9	Pernos 5/16"	10	2,50	25
10	Tornillos M6x25 Avellanado	6	0,06	0,36
11	Lana De Roca Rock Wool 50x600x1000	6	13,27	79,62
12	Gastos De Taller	NA	350,00	350,00
13	Abrazaderas 5"	2	0,92	1,84
14	Masilla Plástica 1/4l	1	5,00	5
15	Desoxidante 1l	1	3,50	3,5
16	Fondo Laca 1/16l	1	2,00	2
17	Fondo Aceite 1/16l	1	2,00	2
18	Pintura Sintética Gris 1/8l	1	4,00	4
19	Pintura Sintética Celeste Eléctrico 1/4l	1	7,00	7
20	Thinner Acrílico 1l	2	10,00	20
21	Desengrasante 1/4l	1	5,00	5
22	Barniz 1/8l	1	5,00	5
23	Catalizador 1/8l	1	6,00	6
24	Extras	NA	25,00	25,00
			TOTAL	726,46

A continuación se describirá de una manera resumida cada uno de los procesos en la construcción de las piezas y partes.

- Se trazó el desarrollo de las partes en planchas de tool negro de 1220[mm] por 2240[mm] cuidando siempre en tener las medidas correctas según los planos y tomando en cuenta que por cada doblado va existir una perdida en medidas igual al espesor de la plancha, además se trata de organizar los trazos de una manera en la que se desperdicie la menor cantidad de material.



FIGURA 47. Etapa de Trazado.

- Se realizó el corte de las partes con la cizalla siempre utilizando guantes de cuero o lana para evitar los cortes, una consideración adicional es siempre verificar las medidas y sujetar con firmeza la plancha hacia la bancada para conseguir cortes lo más recto posibles.



FIGURA 48. Etapa de Corte.

- Se realiza el corte de los ducto de entrada y de salida con una tijera o con una cierra caladora, los ducto son de 125[mm] de diámetro lo que no permite el uso de taladro o saca bocado. Hay que utilizar siempre casco o gafas protectoras y guantes.



FIGURA 49. Corte para la entrada y salida de ducto.

- Se realizan los dobleces en la dobladora manual, siempre verificando los lugares correspondientes a cada doblado, además dependiendo del tipo de la figura y el ángulo de doblado de debe calibrar la dobladora esto quiere decir ajustar las muelas de la misma.



FIGURA 50. Etapa de doblado.

- Se realiza la unión de las partes mediante suelda, ya que el espesor de las planchas es de 0.9[mm] y se desea realizar una unión con soldadura se vio que lo más óptimo era utilizar suelda TIG y MIG, siempre tomando en cuenta la regulación de los parámetros para obtener una soldadura adecuada. En este caso utilizamos para las uniones de la parte externa suelda TIG con gas de protección de Argon, un caudal de 30[CFH], un rango de amperaje de 18 a 22 [A], un voltaje de 10 a 12[V] y un electrodo de 90% de tungsteno y 10% de torio con 1/16[in] de diámetro



FIGURA 51. Etapa de soldado

- Una vez terminado el corte, dobléz y la unión de la parte externa tenemos las piezas de la siguiente manera.



FIGURA 52. Carcasa Externa y estructura interna del secador.

- Se procede a trazar y cortar la lana de roca siguiendo las dimensiones de los planos, la lana de roca viene en placas de 1000[mm] por 600[mm], se traza con un marcador según las dimensiones de los planos y luego se procede a cortar con un estilete siempre utilizando guantes de protección y procurando desperdiciar la menor cantidad de material.



FIGURA 53. Etapa de trazado y corte de la lana de roca.

- Para realizar el ensamble del sandwich se colocan las placas de lana de roca ya cortada en la estructura interna y luego se procede a soldar solo con puntos con soldadura MIG con gas de protección de argón con una presión de 15psi en la boca de la pistola, un amperaje de 14.9[A] y una relación de velocidad e alimentación de carrete de 11.1%.



FIGURA 54. Construcción del Sanduche.

- Las caras interiores de la cámara de secado forman un marco en la cara frontal, en la del lado derecho se instalara las bisagras para la puerta; las bisagras para la puerta necesitan tres perforaciones para tornillos M6x15 por cada bisagra, estas perforaciones se deben realizar antes de hacer el montaje de las caras interiores. Además se coloca una platina de 1cm para cada bisagra y a esta va soldada una tuerca para los correspondientes tornillos.



FIGURA 55. Instalación de las bisagras.

- Una vez que se ha hecho el montaje de la puerta se procede a rellenarla con la lana de roca y de esta manera formar el sandwich de pared.



FIGURA 56. Relleno de lana de roca para la puerta.

- Después se lo cierra completamente soldándola, para eso es necesario el uso de prensas para mantener bien sujeta a la tapa.



FIGURA 57. Unión del Sanduche.

- Una vez terminado la construcción y el montaje de la puerta de acceso se realizan las perforaciones para la tapa trasera, las 6 perforaciones son para pernos de 5/16" x1".



FIGURA 58. Perforaciones para la tapa posterior.

- En la cara posterior de la cámara de secado se colocaran mediante soldadura las tuercas para los pernos 5/16"x1"



FIGURA 59. Instalación de tuercas.

- A continuación se soldaron las ruedas, dos locas en la parte frontal y dos fijas ambas de 100[mm].

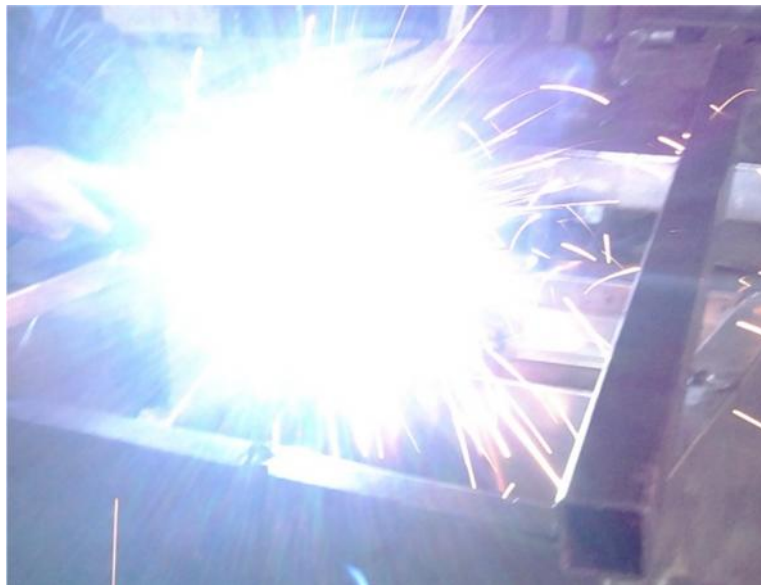


FIGURA 60. Instalación de las ruedas.

- El secador finalizado antes del montaje y pintado de las partes se presenta de la siguiente manera.



FIGURA 61. Secador antes del proceso de pintado y montaje.

- A continuación se resume la etapa de pintado. Lo primero que se procede a hacer es realizar un limpiado de las piezas con antioxidante, se utilizó DESOXIQUIM el cual se puede aplicar mediante brocha o compresor lo importante es dejarlo actuar por unos diez minutos y luego enjuagar con agua y secar. Si existen partes con mucho oxido se puede pasar otras manos repitiendo el proceso.



FIGURA 62. Limpiado de las caras con antioxidante.

- Se procede a corregir las imperfecciones con el uso de masilla de poliéster en combinación de catalizador en pasta, se debe realizar un mezcla en porcentajes bajos de catalizador, se procede a realizar la mezcla y luego untar sobre las partes necesarias con una espátula, se deja secar por unos minutos, una vez seco se procede a ligar para igualar las zonas.



FIGURA 63. Masillado en la carta superior y trasera.



FIGURA 64. Masillado en la cara frontal.

- A continuación aplicamos un fondo gris, este fondo debe permanecer húmedo para después aplicar un fondo crema. Ambos fondos se aplican sobre todas las superficies.



FIGURA 65. Aplicación de fondo gris y fondo crema.

- Ya que el secador se va a pintar de color azul eléctrico por fuera y de un gris aluminio por dentro procedemos a empapelar los bordes con ayuda de cinta adhesiva.



FIGURA 66. Empapelado de los bordes.

- Se pasan de 3 a 5 manos para igualar el tono, después de cada mano se espera un tiempo de 20 a 30 minutos, una vez que se ha obtenido el tono adecuado se procede a pasar otras 3 manos de barniz, al cual se le debe agregar thinner acrílico y catalizador líquido en proporción de 2:1:1.



FIGURA 67. Secador después del pintado y barnizado.

5.2.2. Parte Eléctrica.

La parte eléctrica incluye el montaje de la resistencia y sus conexiones. Adicionalmente se necesita desarrollar un circuito eléctrico que permita el manejo y regulación de la temperatura dentro de la cámara de secado, para ello se ha decidido que lo mejor para esta aplicación es hacer la adquisición de un equipo de control electrónico que permita la regulación de la fuente de calor en la cámara de acondicionamiento.

A continuación se detalla la lista de materiales para la construcción del secador para la parte eléctrica con sus respectivos costos y cantidades.

TABLA 16. Descripción de Materiales Construcción Eléctrica.

MATERIALES PARTE ELÉCTRICA.				
ORD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Gabinete 20x20x15cm	1	15,76	15,76
2	Conector 1/2"	3	0,89	2,67
3	Cable Gemelo #16 X 1m	2	0,52	1,04
3	Bornera 12p #15amp	1	1,25	1,25
4	Cable Siliconado #12 X 1m	5	2,59	12,95
5	Ventilador Solar Palau Td 350/125	1	231,00	231
6	Resistencia Eléctrica	1	90,00	90
7	Relé Estado Sólido 40amp	1	22,00	22
8	Control Digital De Temperatura lbest Tcm-Series	1	67,00	67
9	Termocupla K Tipo Tornillo	1	8,93	8,93
10	Power Push Button Camsco	1	4,91	4,91
11	Extras	NA	25,00	25
			TOTAL	482,51

De la disponibilidad en el mercado y pensado en esta aplicación en particular se escogió el controlador IBEST TEMPERATURE CONTROLLER model: TCM-SR7, cuyas características se encuentran detalladas en la sección de ANEXOS.



FIGURA 68. Controlador de temperatura IBEST TCM-SR7.

Se necesita una termocupla de tipo K la cual va conectada al controlador y es la que manda las señales de entrada.



FIGURA 69. Termocupla tipo K.

Como se describió en el apartado 5.1.55 la potencia de la resistencia es de 1.8[KW] lo que para una instalación de 110[V] significan un amperaje de 16.36[A], por lo que es necesario un relé de estado sólido. Para nuestra

aplicación y de la disponibilidad en el mercado se escogió el relé IBEST SSR-40A.



FIGURA 70. Relé de estado sólido IBEST SSR-40A.

El equipo necesita un switch ON/OFF para las condiciones de nuestra aplicación se escogió el switch mecánico CAMSCO power push button type PWNS 30[A], 3.75KW 600[V].



FIGURA 71. Switch ON/OFF PWNS 30[A]-3.75[KW]-600[V].

Por último se debe escoger un calibre de cable para las conexiones ya que cada uno de los componentes incluyendo el ventilador genera una resistencia y consumo de energía se debe tratar a este como un sistema, de la teoría de la resistencia eléctrica al desarrollar el sistema equivalente se

obtiene que por el circuito recorrerá una corriente de 16.75[A], para lo cual se recomienda un calibre #12 de cable que es recomendable³¹ para aplicaciones de hasta 20[A] en instalaciones a 120[V] .

Los elementos descritos a anteriormente con excepción de la resistencia, el ventilador y la termocupla tipo k se encuentran agrupados en un tablero de control (gabinete metálico) de 20[cm] x 20[cm] x 15[cm].

El funcionamiento del circuito de control se describe a continuación y sus correspondientes diagramas y esquema de conexión se encuentran detallados en la sección de ANEXOS (Planos eléctricos).

Al pulsar el botón de encendido ON del switch se encienden: la resistencia, el ventilador y el controlador eléctrico todos al mismo tiempo. Sin embargo, el controlador eléctrico puede ser manipulado y seteado en cualquier momento. El controlador eléctrico es digital y permite ingresar el valor de la temperatura a la cual queremos que funcione nuestra aplicación en este caso el secador y también permite observar en tiempo real el valor de la temperatura medida por la termocupla; una vez seteado el controlador este estará comparando la señal de entrada de la termocupla con el valor de seteado. Cuando se cumpla la condición de seteo el controlador mandara una señal por uno de sus puertos de salida lo que abre el circuito por medio del relé. De esta manera se mantiene la cámara de acondicionamiento bajo las condiciones requeridas.

³¹ (Black & Decker, 2009, pág. 28)

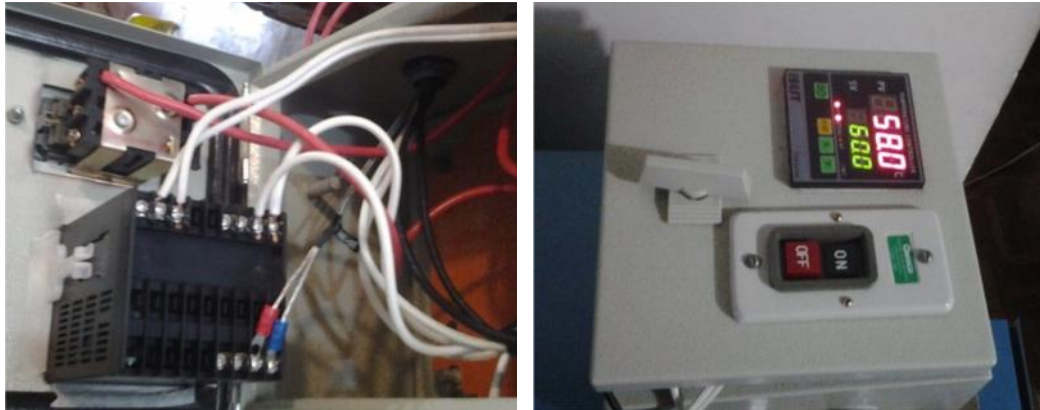


FIGURA 72. Tablero de control Eléctrico.

5.2.3. Montaje de la parte mecánica y parte eléctrica.

Esta es la etapa final de la construcción del secador, se deben colocar tanto las partes mecánicas como son: la puerta de acceso en la cara frontal, la bandeja para las piezas dentro de la cámara de secado y la tapa trasera en la cara posterior del secador. En cuanto a la parte eléctrica se realiza el montaje del ventilador y el tablero de control en la parte superior de la cámara de secado siguiendo la ubicación de los planos, el montaje de la resistencia dentro de la cámara de secado y el montaje de la termocupla dentro de la cámara de secado. Se finaliza con la unión del circuito mediante cables los cuales se describieron en el apartado 5.2.2.



FIGURA 73. Prototipo secador terminado cara frontal interna y externa.



FIGURA 74. Prototipo secador terminado cara lateral derecha.

5.3. VALIDACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.

Una vez finalizada la etapa de diseño y construcción se realizan las respectivas pruebas de funcionamiento y validación de los resultados en pruebas de secado con piezas de cerámica con el fin de comprobar el funcionamiento del secador.

Se realizó un total de cuatro pruebas para la verificación del correcto funcionamiento del prototipo, las mismas que se describen a continuación.

5.3.1. Prueba de funcionamiento sin carga de secado.

Parte importante de esta prueba es que permite ver el consumo energético por hora de uso del secador, parámetro que permitirá estimar un costo operacional, el mismo que deberá ser tomado en consideración para el cálculo del precio del producto si se implementa el sistema descrito.

TABLA 17. Consumo Energético por hora.

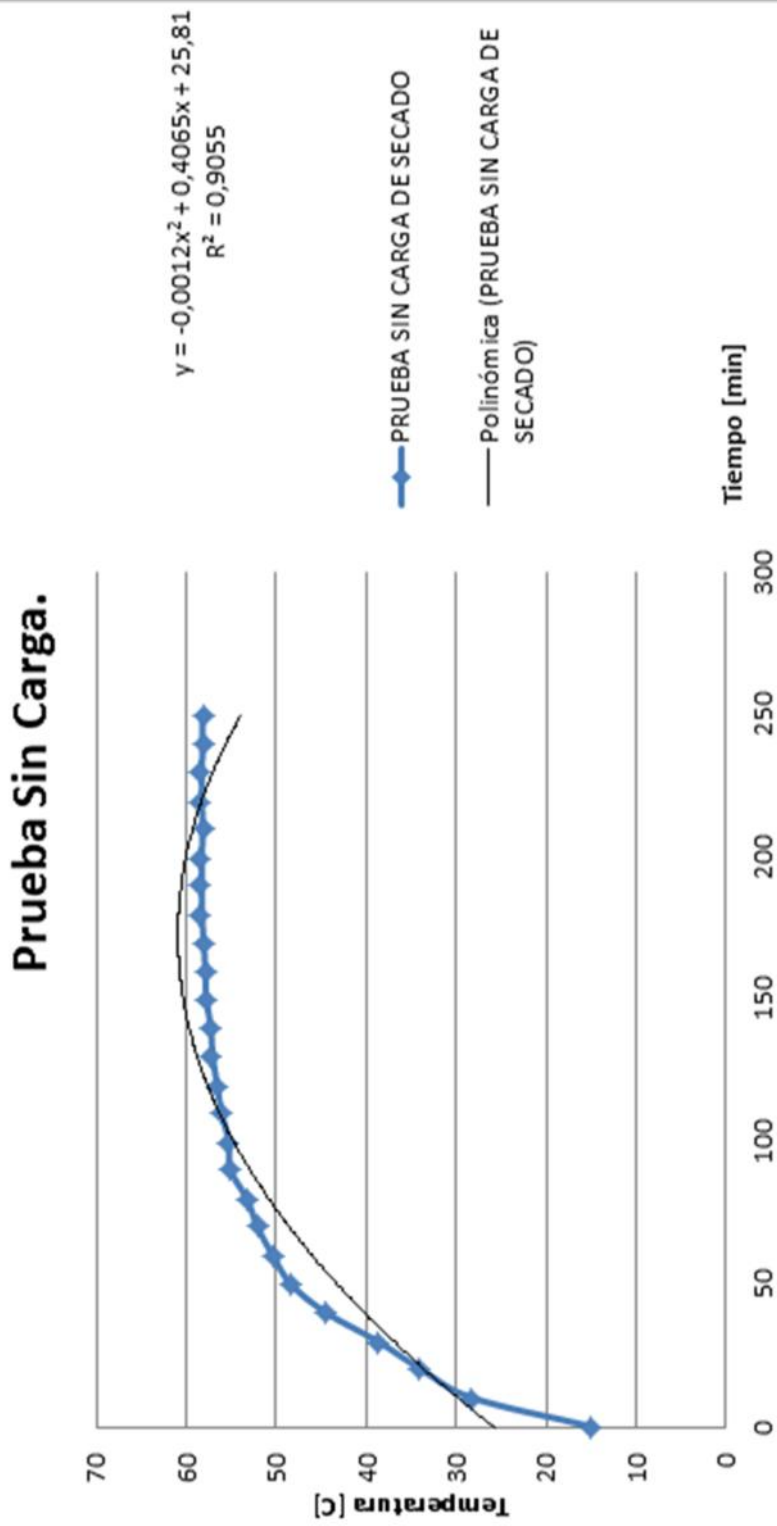
CONSUMO ENERGÉTICO PRUEBA SIN CARGA.		
TIEMPO	P	P
[min]	[Kw/hr]	[Kw-hr]
1 0	380586	
		13
2 60	380599	

El objetivo de esta prueba es comparar que el secador alcance los parámetros de operación y diseño para los cuales fue diseñado, además permitirá comprobar el funcionamiento del circuito de control eléctrico.

El resumen de la prueba se presenta en la **TABLA 18** y **GRÁFICA 7**.

TABLA 18. Resumen Prueba del Secador sin Carga

PRUEBA SIN CARGA.				
Fecha	20/09/2014			
Temperatura Ambiente	17	Hora de Inicio	10:45 AM	
Humedad Relativa	63%	Hora de Finalización	14:55 PM	
ORD	TIEMPO	TEMPERATURA DENTRO DE LA CAMARA DE SECADO	TEMPERATURA DE OPERACIÓN	TEMPERATURA DE DISEÑO
	[min]	[°C]	[°C]	[°C]
1	0	15		
2	10	28,2		
3	20	33,9		
4	30	38,8		
5	40	44,5		
6	50	48,4		
7	60	50,4		
8	70	52,1		
9	80	53,3		
10	90	55,1		
11	100	55,3		
12	110	56,1		
13	120	56,6		
14	130	57,1	50	60
15	140	57,3		
16	150	57,8		
17	160	57,9		
18	170	58,1		
19	180	58,3		
20	190	58,3		
21	200	58,3		
22	210	58,2		
23	220	58,3		
24	230	58,3		
25	240	58,2		
26	250	58,2		



GRÁFICA 7. Gráfica de la prueba sin carga de secado.

5.3.2. Prueba de secado con intervalo de temperatura.



FIGURA 75. Pieza de cerámica para la prueba 1.
Izquierda: Pieza húmeda. Derecha: Pieza Seca.

La prueba consiste en setear el control de temperatura en tres valores de temperatura que se encuentren dentro del rango de valores de temperatura de operación para nuestro caso en particular se dividió en tres partes $T1=25[^\circ\text{C}]$, $T2=40[^\circ\text{C}]$ y $T3=50[^\circ\text{C}]$.

Para el intervalo de tiempo de cada temperatura se dividió al tiempo total estimado de secado calculado en el apartado 5.1.23, por otro lado se estará monitoreando el estado de la pieza durante el proceso y mediante la observación se puede ir variando los rangos.

La prueba se realizó con una figura de Santa Claus de cerámica cuyas características se presentan en la **TABLA 19**.

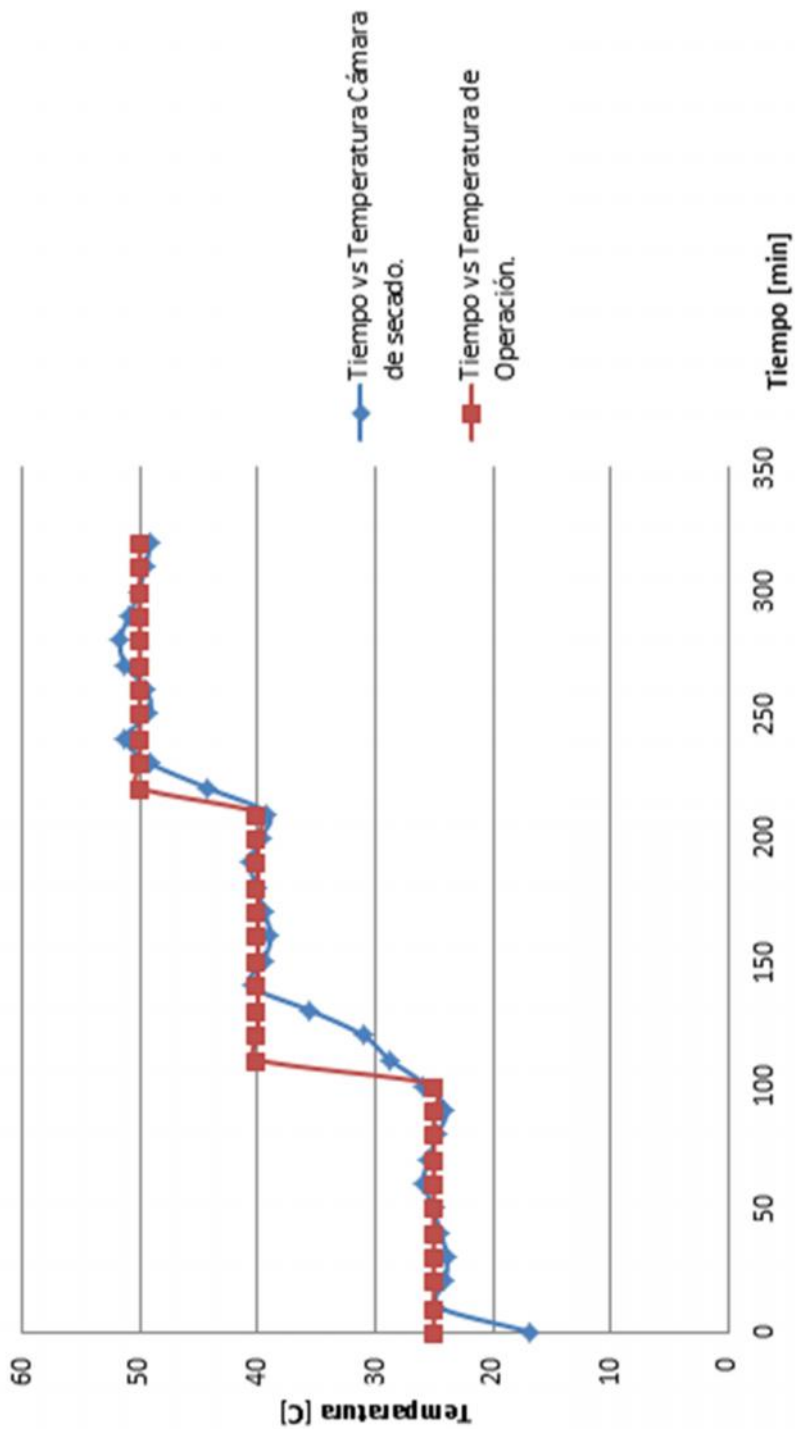
TABLA 19. Especificaciones Prueba 1.

ESPECIFICACIONES DE LA PIEZA. PRUEBA DE SECADO 1.			
Denominación.		Santa A	
Fecha.		04/10/2014	
Tiempo de Secado.		4hrs, 30min	
Temperatura Ambiente. [°C]	18	Hora de Inicio.	9:30 AM
Humedad Relativa. [%]	55	Hora de Finalización.	14:00 PM
Espesor de la Pieza. [mm]	5	Peso Seco Referencial. [kg]	3,02
Peso Estado Húmedo. Antes del Secado. [kg]	3,44	Peso Estado Seco. Después del Secado. [kg]	2,89
Agua Removida. Calculada. [kg]	0,46	Agua Removida. Medida. [kg]	0,55

TABLA 20. Resumen Prueba de Secado 1.

RESUMEN PRUEBA DE SECADO 1			
ORD	TIEMPO	TEMPERATURA CÁMARA DE SECADO	TEMPERATURA DE OPERACIÓN
	[min]	[°C]	[°C]
1	0	17	25
2	10	24,7	25
3	20	24,1	25
4	30	23,9	25
5	40	24,5	25
6	50	25,1	25
7	60	25,9	25
8	70	25,5	25
9	80	24,7	25
10	90	24	25
11	100	25,8	25
12	110	28,8	40
13	120	31,1	40
14	130	35,6	40
15	140	40,6	40
16	150	39,5	40
17	160	38,9	40
18	170	39,5	40
19	180	40,1	40
20	190	40,7	40
21	200	39,7	40
22	210	39,2	40
23	220	44,3	50
24	230	49,1	50
25	240	51,3	50
26	250	49,2	50
27	260	49,5	50
28	270	51,3	50

Prueba de Secado 1.



GRÁFICA 8. Prueba de Secado 1.

5.3.3. Prueba de secado a temperatura de secado constante.



FIGURA 76. Pieza de cerámica para la prueba 2.
Izquierda: Pieza húmeda. Derecha: Pieza Seca.

La prueba de secado a temperatura de operación constante consiste en colocar una carga de secado, una pieza de cerámica en estado húmedo, y setear el control de temperatura a temperatura de secado $T_{\text{sec}} = 50[^\circ\text{C}]$, a diferencia de la prueba de secado a intervalo de temperaturas el incremento es continuo completamente hasta llegar a la temperatura de operación.

Lo que se pretende es mantener toda la etapa de secado bajo las mismas condiciones de temperatura, humedad y velocidad de aire circundante. La prueba se realizó con una figura de una Virgen de cerámica cuyas características se presentan en la **TABLA 21**.

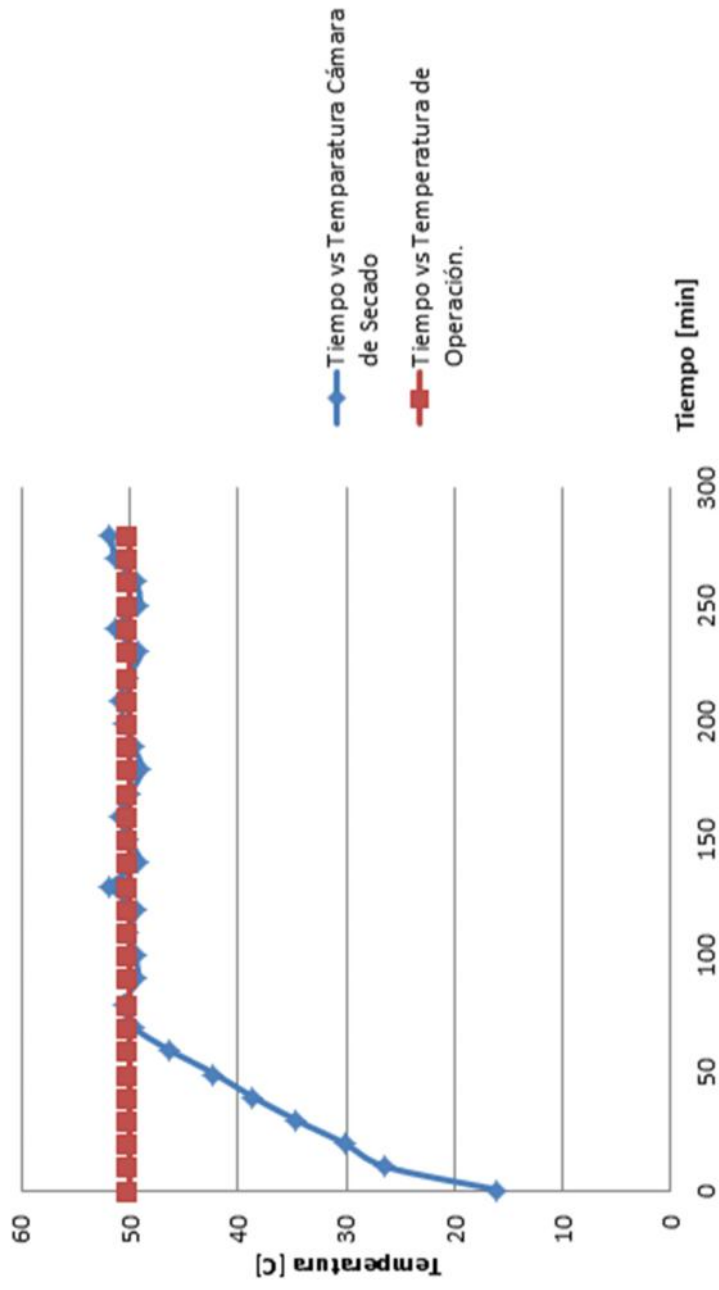
TABLA 21. Especificaciones Prueba 2.

ESPECIFICACIONES DE LA PIEZA. PRUEBA DE SECADO 2.			
Denominación	Virgen A		
Fecha	05/10/2014		
Tiempo Total de Secado.	4hrs, 40min.		
Temperatura Ambiente. [°C]	17	Hora de Inicio.	13:30 PM
Humedad Relativa. [%]	50	Hora de Finalización.	18:10 PM
Espesor de la Pieza. [mm]	5	Peso Seco Referencial. [kg]	2,25
Peso Estado Húmedo. Antes del Secado. [kg]	2,40	Peso Estado Seco. Después del Secado. [kg]	1,96
Agua Removida. Calculada. [kg]	0,34	Agua Removida. Medida. [kg]	0,44

TABLA 22. Resumen Prueba de Secado 2.

RESUMEN PRUEBA DE SECADO 2			
ORD	TIEMPO	TEMPERATURA DENTRO DE LA CÁMARA DE SECADO	TEMPERATURA DE OPERACIÓN
	[min]	[°C]	[°C]
1	0	16	50
2	10	26,4	
3	20	30,2	
4	30	34,7	
5	40	38,7	
6	50	42,3	
7	60	46,4	
8	70	49,7	
9	80	50,5	
10	90	49,3	
11	100	49,5	
12	110	50,1	
13	120	49,5	
14	130	51,7	
15	140	49,2	
16	150	50,1	
17	160	50,9	
18	170	49,9	
19	180	48,9	
20	190	49,7	
21	200	50,5	
22	210	50,8	
23	220	50,1	
24	230	49,1	
25	240	51,3	
26	250	49,2	
27	260	49,5	
28	270	51,3	
29	280	51,7	

Prueba de Secado 2.



GRÁFICA 9. Prueba de Secado 2.

5.3.4. Prueba de secado a temperatura de secado constante con múltiple carga.



FIGURA 77. Piezas de cerámica para la prueba 3.
Superior: Piezas húmedas. Inferior: Piezas Secas.

La prueba a continuación pretende demostrar la capacidad del secador, además de comparar los tiempos de secado con las pruebas realizadas en los apartados: 5.3.1 Prueba de funcionamiento sin carga de secado. 5.3.2 Prueba de secado con intervalo de temperatura. 5.3.3 Prueba de secado a temperatura de secado constante.

Para la prueba se secaran dos piezas juntas las cuales tienen diferentes características tanto en forma como en peso, en la **TABLA 23** se describe cada una de ellas.

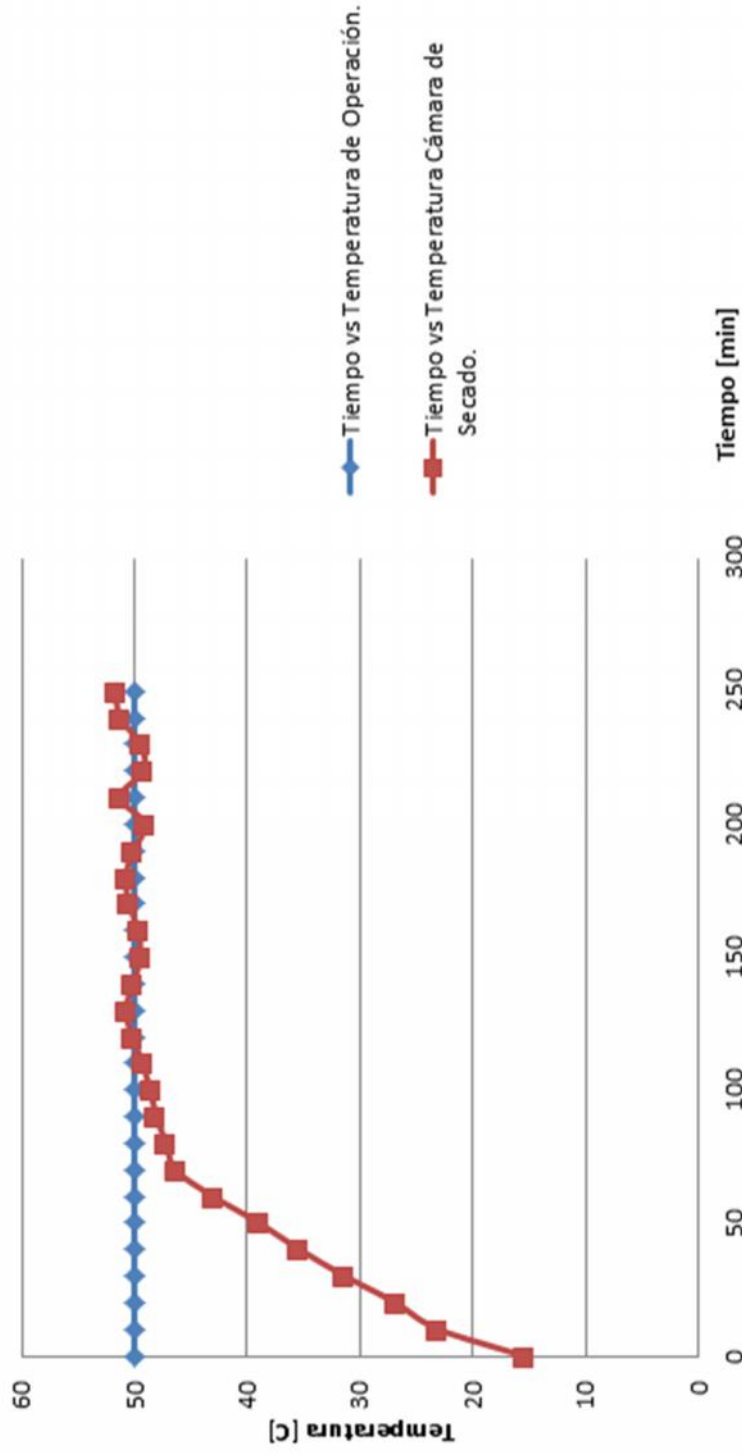
TABLA 23. Especificaciones Prueba 3.

ESPECIFICACIONES DE LAS PIEZAS. PRUEBA DE SECADO 3			
Fecha.		06/10/2014	
Tiempo Total de Secado.		4hrs, 10min	
Temperatura Ambiente. [°C]	17	Hora de Inicio	9:15 AM
Humedad Relativa. [%]	63	Hora de Finalización.	13:25 PM
PIEZA1: SANTA B.			
Espesor de la Pieza. [mm]	5	Peso Seco Referencial. [kg]	3,02
Peso Estado Húmedo. Antes del Secado. [kg]	3,27	Peso Estado Seco. Después de Secado. [kg]	2,81
Agua Removida. Calculada. [kg]	0,46	Agua Removida. Medida. [kg]	0,45
PIEZAS 2: VIRGEN B.			
Espesor de la Pieza. [mm]	5	Peso Seco Referencial. [kg]	2,25
Peso Estado Húmedo. Antes del Secado. [kg]	2,17	Peso Estado Seco. Después del Secado. [kg]	1,77
Agua Removida. Calculada. [kg]	0,34	Agua Removida. Medida. [kg]	0,40

TABLA 24. Resumen Prueba de Secado 3.

RESUMEN PRUEBA DE SECADO 3.			
ORD.	TIEMPO.	TEMPERATURA DENTRO DE LA CAMARA DE SECADO.	TEMPERATURA DE OPERACIÓN.
	[min]	[°C]	[°C]
1	0	15,5	50
2	10	23,1	
3	20	26,9	
4	30	31,4	
5	40	35,4	
6	50	39	
7	60	43,1	
8	70	46,4	
9	80	47,2	
10	90	48,1	
11	100	48,6	
12	110	49,3	
13	120	50,2	
14	130	50,8	
15	140	50,1	
16	150	49,5	
17	160	49,7	
18	170	50,5	
19	180	50,8	
20	190	50,1	
21	200	49,1	
22	210	51,3	
23	220	49,2	
24	230	49,5	
25	240	51,3	
26	250	51,7	

Prueba de Secado 3.



GRÁFICA 10. Prueba de Secado 3.

5.3.5. Resumen de pruebas de secado.



FIGURA 78. Piezas para pruebas de secado.
Superior: Piezas húmedas. Inferior: Piezas Secas.

Una vez realizadas las pruebas de secado se resumen los resultados en una tabla para compararlos y posteriormente analizarlos, la **TABLA 25** resume los resultados de las prueba de secado descritas en los apartados 5.3.2 Prueba de secado con intervalo de temperatura. 5.3.3 Prueba de secado a temperatura de secado constante. y 5.3.4 Prueba de secado a temperatura de secado constante con múltiple carga.

TABLA 25. Resumen de Pruebas de Secado.

RESUMEN DE PRUEBAS DE SECADO.									
Prueba.	Denominación.	Peso Seco Referencial.	Agua Removida Calculada.	Espesor de la Pieza.	Peso Estado Húmedo Antes de secado.	Tiempo de Secado.	Peso Estado Seco. Después de Secado.	Agua Removida. Medida.	
		[kg]	[kg]	[mm]	[kg]	[min]	[hrs-min]	[kg]	[kg]
1	Santa A	3,02	0,46	5	3,44	270	4-30	2,89	0,55
2	Virgen A	2,25	0,34	5	2,40	280	4-40	1,96	0,44
3	Santa B	3,02	0,46	5	3,27	250	4-10	2,81	0,46
	Virgen B	2,25	0,34	5	2,17			1,77	0,40

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. CONCLUSIONES.

- El equipo secador para piezas de cerámica blanca fue diseñado y construido bajo el sustento teórico y práctico, así como fundamentado en la consulta e investigación.
- El equipo funciona según lo planificado y bajo los parámetros para los cuales fue diseñado. La prueba de funcionamiento sin carga demostró que el secador alcanza la temperatura de operación de 50°C en 1 hora y una temperatura de diseño de 58°C en 3 horas.
- La prueba de funcionamiento a intervalo de temperatura demostró que para la pieza de prueba con 3,44[kg] de peso en estado húmedo se eliminaron 0,55[kg] de humedad (agua) que resulta ser mayor a la cantidad requerida por el producto 0,46[kg] en un tiempo de 4 horas con 30 minutos.
- La prueba a temperatura de secado constante 50°C demostró que para la pieza de prueba de 2,40[kg] de peso en estado húmedo se eliminaron 0,44[kg] de humedad en un tiempo de 4 horas con 40 minutos, resultando mayor a la cantidad de humedad requerida por el producto 0,34[kg].
- La prueba de secado a temperatura de secado constante 50°C con múltiple carga demostró que las piezas en estudio: Santa B de 3,27[kg] de peso en estado húmedo perdió 0,46[kg] de humedad, y Virgen B de 2,17[kg] de peso en estado húmedo perdió 0,40[kg] de humedad. El tiempo de secado para ambas piezas fue de 4 horas y 10 minutos las cantidades de humedad están dentro de los parámetros requeridos.

- Los tiempos de secado reales de todas las pruebas se encuentran al rededor al tiempo estimado de secado 4,3 horas con una diferencia de más menos 20 min.
- El prototipo secador tiene un consumo de 13Kw-hr.
- El equipo secador de piezas de cerámica blanca demostró que puede bajar los tiempos de secado de un intervalo de 8-12 horas a menos de cinco horas dependiendo la carga sin provocar daño o imperfecciones en las piezas.

6.2. RECOMENDACIONES.

- El diseño de este prototipo tuvo como fuente de energía una resistencia niquelina, de desarrollar un diseño para un carga de secado más grande se debería considerar utilizar una fuente de calor con mayor potencia de ser el caso sería conveniente utilizar resistencias para aire para voltaje de 220[V] o cambiar a otro sistema como el uso de quemadores industriales.
- De la organización de las piezas dentro de la cámara de secado dependerá de la cantidad de piezas a secar y las dimensiones de las mismas. Es preferible que se encuentren agrupadas en piezas de las mismas dimensiones y pesos ya que de esa manera se garantizara que todas las piezas se sequen en su totalidad y al mismo tiempo.
- Si se pretende realizar armarios de secado para cargas industriales es importante considerar un estudio más profundo del comportamiento del aire dentro del dúcto. Un cálculo profundo de las perdidas mayores y menores será indispensable para la correcta selección de un ventilador.
- Para sistemas industriales se recomendaría realizar un estudio de viabilidad con el fin de invertir en un sistema de automatización que permita la implementación de un sistema de flujo cerrado o de ser el caso la implementación de un sistema de cogeneración.

BIBLIOGRAFÍA.

- ASHRAE. (2009). *ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI)*. The United States.
- Black, & Decker. (2009). *La Guía Completa sobre Instalaciones Eléctricas*. España: Creative Publishing.
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). *Materials Science and Engineering. An Introduction*. United States of America.: John Wiley & Sons. Inc.
- Cárdenas, J., Paredes, C., & Mosquera, J. (2003). La Industria Cerámica en el Ecuador. *Escuela Politécnica del Litoral TECNOLOGÍA*, 19-23.
- Cary, H. B. (1992). *Manual de Soldadura Moderna TOMO 1*. México: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A.
- Cary, H. B. (1992). *Manual de Soldadura Moderna TOMO 2*. México: PRENTICE-HALL HIPANOAMERICANA, S.A.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2003). *Termodinámica*. México: McGrw-Hill Interamericana.
- -INAMHI-, I. N. (2010). Anuario Metereológico . *Anuario Metereológico*
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México.: Prentice Hall.
- Mott, R. L. (2006). *Mecanica de Fluidos*. México: Pearson .
- Mujundar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying*. The United States: CRC Press Taylor & Francis Group, LLC.
- Perry, R. H. (1994). *Manual del Ingeniero Químico*. México.: McGraw-Hill.
- Smith, W. F. (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. España.: McGrand-Hill.
- Treybal, R. E. (1988). *Operaciones de Transferencia de Masa*. Mexico: McGraw-Hill.

ANEXO A: CARTAS PSICROMÉTRICAS.

CARTAS PSICROMÉTRICAS

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL.

CARTAS PSICROMÉTRICAS

UNIDADES INGLESAS.

ANEXO B: PLANOS DE CONJUNTO.

ANEXO C: PLANOS DE DETALLE.

ANEXO D: ESQUEMA Y DIAGRAMA ELÉCTRICO.

ANEXO E: CATÁLOGO DE PARTES MECÁNICAS.

CATÁLOGO DE PARTES MECÁNICAS.

PLANCHA DE TOOL NEGRO.

CATÁLOGO DE PARTES MECÁNICAS.

PLNACHAS DE TOOL PERFORADO.

CATÁLOGO DE PARTES MECÁNICAS.

AISLANTE TÉRMICO.

ANEXO F: CATÁLOGO DE PARTES ELÉCTRICAS.

CATÁLOGO DE PARTES ELÉCTRICAS.

CARACTERÍSTICAS VENTILADOR.

CATÁLOGO DE PARTES ELÉCTRICAS.

CARACTERÍSTICAS DEL RELÉ DE ESTADO SÓLIDO.

CATÁLOGO DE PARTES ELÉCTRICAS.

CARACTERÍSTICAS CONTROL ELÉCTRICO DIGITAL.

CATÁLOGO DE PARTES ELÉCTRICAS.

CARACTERÍSTICAS TERMOCUPLA TIPO K.