

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TÍTULO:

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SECADOR SOLAR
TIPO INVERNADERO DE QUINUA (*Chenopodium quinoa*) EN LA EMPRESA WARI
GROUP S.A.C EN AYACUCHO”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR

Bach. HUAMANÍ CÓRDOVA, Henry

Ayacucho – Perú

2018

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A toda mi familia y en forma especial a mis padres por su apoyo, dedicación y sus sabios consejos.

Finalmente a los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que me ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis en especial al Ing. Bernardo Enciso López y al Ing. Alfredo Arias Jara.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis de fin de carrera, así como el camino realizado hasta llegar a este punto, no habría sido posible sin el apoyo y ánimo de:

- Mis padres: gracias por brindarme todas las facilidades todos estos años, gracias por los valores que me han inculcado desde pequeño, constancia y trabajo.
- Mi asesor de tesis: Ing. Bernardo Enciso López, gracias por motivarme para realizar este proyecto, estar siempre disponible para asesorarme desde la primera vez que iniciamos el plan.
- Mis profesores de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Química por haberme inculcado conocimientos, por haberme formado como profesional y por el apoyo recibido.
- Al Ing. Paulino Huamantínco Quispe Gerente General de la Empresa “Corporación Agroindustrial Wari Group S.A.C”, por su gran apoyo durante los meses de trabajo.
- Mis compañeros y amigos de la universidad por los grandes momentos vividos y por todo lo que he aprendido.

Gracias a todos los que no he citado, y a muchos otros que han permitido que llegue a este punto de mi vida con alegría y optimismo.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
GLOSARIO	13
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN.....	16
CAPITULO I	17
ASPECTOS GENERALES.....	17
1.1. Justificación.....	17
1.2. Planteamiento del problema	17
1.2.1. Identificación del problema	17
1.2.2. Descripción del problema	18
1.2.3. Delimitación del problema.....	18
1.2.4. Formulación del problema.....	18
• Problema principal.....	18
• Problema específico.....	18
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo principal.....	19
1.3.2. Objetivo específico.....	19
1.4. Hipótesis.....	19
1.4.1. Hipótesis general.....	19
1.4.2. Hipótesis específicas	19
1.5. Variable e indicadores.....	20
CAPÍTULO II	21
MARCO TEORICO	21
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	21
2.2. QUINUA.....	24
2.2.1. Taxonomía de la Quinoa (Chenopodium quinoa W.)	24
2.2.2 Definición de la quinua	24

2.2.3 Características de la quinua	25
2.2.4. Valor nutritivo del grano de la quinua	25
2.2.5. Características Productivas	27
2.2.6. Localización de la producción de quinua en el Perú	27
2.2.7. Formas de Presentación de la Quinua	28
2.3. SECADO	29
2.3.1. Proceso de secado	29
2.3.2. Tiempos de Secado	30
a). Ecuaciones de Tiempo de Secado	31
b). Modelos Matemáticos	31
Modelo de Page	32
2.3.3. Curva y Velocidad de Secado	32
2.3.4. Factores que influyen en el proceso de secado	36
a). Humedad relativa del aire	36
b). Humedad de los granos	36
c). Temperatura	36
d). Velocidad del aire	36
2.3.5. El punto de secado en la quinua	37
2.3.6. El secado en patio de cemento	38
Ventajas	38
Desventajas	38
2.4. LA ENERGÍA DEL SOL	39
2.4.1. Emisión radiactiva desde el sol	39
2.4.2. Estimación de la radiación solar	40
2.4.3. Energía solar en el Perú	42
2.4.4. Radiación solar en Ayacucho	43
2.5. SECADORES SOLARES	44
2.5.1. Secadores de granos	44
2.5.2. Tipos de secadores solares	45
a). Secadora solar indirecta	45
b). Secadora solar directa	47
c). Secadora solar mixta:	47
2.5.3. Principios y parámetros físicos del secador solar	48

a). Efecto invernadero:.....	48
b). Transferencia de calor por convección	48
c). Transferencia de masa por convección.....	48
2.5.4 Forma de Operación del secador solar	49
a). Secado en tandas	49
b). Secado continuo	49
2.5.5. Capacidad de Producción.	49
2.5.6. Ventajas y desventajas de la secadora solar.....	50
2.6. SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO	51
2.6.1. Prototipo de secadores solares.....	52
2.6.2. Tipos de circulación.....	53
a). Circulación por convección natural.....	54
b). Circulación forzada:	54
2.6.3. Partes de un secador solar tipo invernadero.....	55
2.6.4. Características de los sólidos	56
a). Contenido de Humedad	56
b). Contenido de Humedad de Equilibrio.....	57
c). Humedad Inicial Óptima.....	57
d). Humedad Final Óptima	57
2.6.5. Caracterización de los sólidos húmedos	58
a). Porcentaje de humedad:.....	58
b). Fracción másica de humedad:	58
c). Humedad absoluta:	59
d). Calor específico del sólido húmedo:.....	59
e). Entalpía específica del sólido húmedo:	59
2.6.6. Evaluación de secadores	59
Secadores batch: cámaras de secado	60
a). Balance de Materia	60
b). Balance de Energía:.....	61
2.6.5. Material para el techado	63
CAPÍTULO III	66
MATERIALES Y MÉTODOS	66
3.1. UBICACIÓN Y LUGAR DE LA EXPERIMENTACIÓN	66

3.2. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	67
3.3. MATERIALES Y EQUIPOS.....	68
3.3.1. Materia prima	68
3.3.2. Equipos e instrumentos	68
3.4. CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS	69
3.4.1. Evaluación inicial de calidad de la muestra	69
3.5. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL.....	70
3.5.1. Elaboración del perfil de temperatura y porcentaje de humedad.	70
3.5.2. Criterios de aceptación	70
CAPÍTULO IV.....	71
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR.....	71
4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ACTUAL	71
4.1.1. Despedrado	71
4.1.2. Silo pulmón	72
4.1.3. Escarificado	73
4.1.4. Lavado: (250 kg / batch).....	74
4.1.5. Centrifugado	75
4.1.6. Secado	76
4.1.7. Seleccionador por tamaño.....	77
4.1.8. Pesado.....	78
4.1.9. Almacén	78
4.2. DISEÑO DEL SECADOR SOLAR	79
4.2.1. Selección del tipo de secador.	79
4.2.2. Procedimiento de diseño	80
4.2.3. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño.....	80
4.2.4. Determinación de los parámetros de funcionamiento.....	81
4.2.5. Determinación de los parámetros térmicos y termodinámicos	81
4.2.6. Consideraciones generales del diseño	82
4.2.7. Consideraciones psicrométricas	82
Para una $F_o= 1500$ kg.....	84
4.2.8. Cálculos de diseño.....	85
4.2.9. Energía calorífica necesaria para calentar el aire	86
4.2.10. Cálculo de la radiación global	86

4.3. CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO	86
4.3.1. Selección de terreno	88
4.3.2. Construcción del secador solar	88
4.3.3. Cálculo de costo del secador solar	95
4.4. PUESTA EN MARCHA DEL SECADOR SOLAR	95
4.4.1. Forma de operación	95
4.4.2. Evaluación de rendimiento térmico para el secador fabricado.	96
4.4.3. Evaluación de tasa de disminución de tiempo de secado.....	97
4.4.4. Controles en la determinación del tiempo de secado de la quinua	97
4.5. EVALUACIÓN DEL SECADOR SOLAR	98
4.5.1. Procedimientos durante el secado	98
4.5.2. Características físicas del grano de quinua	98
4.5.3. Perfil de temperatura.....	98
4.5.4. Curvas y velocidad de secado	99
a). Para una carga $F_o = 1500$ kg. (Día nublado).	101
b). Para una carga $F_o = 1000$ kg : Día soleado	103
c). Para una carga $F_o = 1250$ kg en el secador solar	105
d). Para una carga $F_o = 1500$ kg día soleado.....	106
4.5.6. Balance de materia y energía de los granos	108
Para una $F_o = 1500$ kg.....	108
CAPÍTULO V.....	113
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	113
5.1. PERFIL DE TEMPERATURA DEL SECADOR SOLAR:	113
5.2. CURVAS Y VELOCIDAD DE SECADO	114
5.2.1. Para una carga $F_o = 1500$ kg. (Día nublado).....	114
5.2.2. Para una carga $F_o = 1000$ kg : Día soleado.....	115
5.2.3. Para una carga $F_o = 1250$ kg (día soleado).....	116
5.2.4. Para una carga $F_o = 1500$ kg (día soleado).....	118
5.2.5. Balance de materia y energía de los granos	119
5.3. RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE SECADOR, ESPESOR DE QUINUA EN EL SECADOR, TIEMPO DE SECADO	120
5.4. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE FACTORES QUE INFLUYEN EN EL SECADO DE LOS GRANOS	121
5.5. RESULTADOS SOBRE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE PLANTA CON EL SECADOR SOLAR	121

CONCLUSIONES.....	124
RECOMENDACIONES.....	126
Bibliografía	127
ANEXOS	129
Anexo n° 1: Datos de perfil de temperatura.....	129
Anexo n°2: Norma técnica peruana sobre granos de Quinoa	131
Anexo n° 3: Norma Técnica peruana – Requisitos microbiológicos.	132
Anexo n°4: Diagrama Psicrométrico a 548mmHg.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura n° 2.1: Valor comparativo de la proteína de quinua con otros cereales.	26
Figura N° 2.2: Producción de quinua en el Perú (1950-2014)	27
Figura n° 2.3: Producción de quinua (en ton) por regiones (2001-2014)	28
Figura n° 2.4: Curva de secado	30
Figura n° 2.5: Curvas típicas de secado de materiales sólidos.....	33
Figura n° 2.6: Curvas de velocidad de secado de materiales sólidos	35
Figura n° 2.7: Variación de la velocidad (9am-2pm).....	37
Figura n° 2.8: Variación de la velocidad del viento (9am-2pm).....	37
Figura n° 2.9: Variación de radiación (03/10/2013). Huamanga	43
Figura n° 2.10: Variación de radiación (03/10/2013). Huamanga	44
Figura n° 2.11: Secador solar indirecto.....	46
Figura n° 2.12: Características según capacidad de producción	50
Figura n° 2.13: Secador solar con cubierta de plástico.	51
Figura n° 2.14: Imagen prototipo de secador solar.	52
Figura n° 2.15: Secador solar con paseras divididas	52
Figura n° 2.16: Prototipo del diseño frontal del secador.....	53
Figura n° 2.17: Cubierta de un secador solar.	56
Figura n° 2.18: Perfil de balance de materia.....	60
Figura n° 2.19: Perfil de balance de energía	61
Figura n° 3.1: Ubicación del lugar de la construcción del secador solar	66
Figura n° 3.2: Diagrama de flujo de procesamiento de quinua en Wari Group S.A.C.	67
Figura n° 4.1: Vista de la despedradora.....	72
Figura n° 4.2: Divisiones de la despedradora.	72
Figura n° 4.3: Vista de tanque pulmón.....	73
Figura n° 4.4: Vista de la escarificadora.	74
Figura n° 4.5: Partes del escarificador.....	74
Figura n° 4.6: Vista del tanque lavador y centrifugado.	76
Figura n° 4.7: Secado tradicional	76
Figura n° 4.8: Vista de la seleccionadora de granos.....	77
Figura n° 4.9: Partes de la seleccionadora de granos.....	78
Figura n° 4.10: Área de pesado.	78
Figura n° 4.11: Vista del almacén de granos orgánicos.....	79
Figura n° 4.12: Bosquejo inicial del secador solar	87
Figura n° 4.13: Modelo de cubierta	87
Figura n° 4.14: Espacio para la construcción	89
Figura n° 4.15: Columnas de soporte	89
Figura n° 4.16: Armazón de vigas de metal en forma de U.....	90
Figura n° 4.17: Colocación de las vigas de metal.....	90
Figura n° 4.18: Armazón del secador solar.	90
Figura n° 4.19: Recepción del policarbonato.	91
Figura n° 4.20: Inicio del techado con policarbonato.....	91
Figura n° 4.21: Vista de un avance del techado	91
Figura n° 4.22: Secador solar concluido con el techado.....	92

Figura n° 4.23: Colocación de la planchas de acero inoxidable.	92
Figura n° 4.24: Vista de la ventana principal de ventilación.	93
Figura n° 4.25: Ventanas auxiliares	93
Figura n° 4.26: Vista de la construcción concluida	94
Figura n° 4.27: Vista del interior del secador solar.	94
Figura n° 4.28: Procedimientos durante el secado.....	98
Figura n° 4.29: Perfil de temperatura	99
Figura n° 4.30: Periodos en la variación de la humedad absoluta para F=1974kg	102
Figura n° 4.31: periodos de secado en X vs R para F=1974kg.	103
Figura n° 4.32: Periodos en la variación de la humedad absoluta para F=1263kg	104
Figura n° 4.33: Periodos de secado en X vs R para F=1263kg.....	104
Figura n° 4.34: Periodos en la variación de la humedad absoluta para F=1575kg	105
Figura n° 4.35: Periodos de secado en X vs R para F=1575kg.....	106
Figura n° 4.36: Periodos en la variación de la humedad absoluta para F=1890kg	107
Figura n° 4.37: Periodos de secado en X vs R para F=1890kg.....	108
Figura n° 5.1: Diagrama de bloque de materia prima procesada 2016	123
Figura n° 5.2: Materia procesada 2016 Wari Group S.A.C.	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla n° 2.1: Clasificación taxonómica de la quinua	24
Tabla n° 2.2: Características alimenticias de la quinua (%).....	26
Tabla n° 2.3: Radiación solar promedio en el Perú.....	42
Tabla n° 2.4: Valores de las constantes a y b para Ayacucho.....	43
Tabla n° 2.5: Valores de circulación térmica.....	55
Tabla n° 3.1: Requisitos bromatológicos de los granos de quinua	70
Tabla n° 4.1: Flujo másico del despedrado.	71
Tabla n° 4.2: Flujo másico de escarificado.	73
Tabla n° 4.3: Tiempo de lavado de la quinua	75
Tabla n° 4.4: Características de la seleccionadora.	77
Tabla n° 4.5: Resumen de las condiciones del aire.....	83
Tabla n° 4.6: Balance de costos de la construcción del secador solar	95
Tabla n° 4.7: Datos de curvas y velocidad de secado para una carga húmeda (F) de 1974 kg.....	101
Tabla n° 4.8: Datos de curvas y velocidad de secado para una carga húmeda (F) de 1263kg.....	103
Tabla n° 4.9: Datos de curvas y velocidad de secado para una carga húmeda (F) de 1575kg.....	105
Tabla n° 4.10: Datos de curvas y velicad de secado para una carga humedad (F) de 1890 kg.....	106
Tabla n° 5.1: Capacidad del secador solar, altura de lecho y tiempo de secado:	120
Tabla n° 5.2: Capacidad de producción o de materia prima Wari Group S.A.C	122

Glosario

Patios de cemento: se refiere a un terreno que el suelo está pavimentado de **cemento**.

Mantadas: son tejidos de rafia de polipropileno en formas planas sobre la cual se tiende los granos de quinua y se pone a secar.

Nylon: es un polímero sintético que pertenece al grupo de las poliamidas

Prototipo: Primer ejemplar que se fabrica de una figura, un invento u otra cosa, y que sirve de modelo para fabricar otras iguales, o molde original con el que se fabrica

Rango de tiempo: es el tiempo de duración, lapso de tiempo.

Cuello de botella: es una fase de la cadena de producción más lenta que otras, que hace lento el proceso de producción global.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

OMS: Organización Mundial de la Salud

Batch: proceso de carga y descarga.

Carga: hace referencia que cantidad de kg de quinua lavada se pone al secador solar.

Fo: kg de quinua que ingresa al lavado.

F: kg de carga húmeda que ingresa al secador solar

RESUMEN

La forma tradicional del secado de la quinua en la región de Ayacucho, es al aire libre sobre patios de cemento y mantadas, donde se exponen los granos húmedos directamente a los rayos del sol, durante varias horas, removiéndolo constantemente hasta alcanzar la reducción adecuada de la humedad.

El sistema de secado en patio es simple y barato, pero implica mucho movimiento de la quinua pues debe protegerse de lluvias repentinas, del polvo, la basura y los animales; también se debe guardar o cubrir la quinua por la noches para evitar que vuelva a absorber la humedad ambiental

El desarrollo y modernización de los antiguos métodos de secado permite implementar aplicaciones para mejorar la calidad de secado obteniendo un mejor rendimiento en la calidad del grano y una disminución significativa de contaminación.

La necesidad de evitar la contaminación de la quinua durante el secado en patio o tradicional (mantadas). Hizo que la planta WARI GROUP S.A.C. se encontrase en la necesidad de evitar ésta contaminación debido a que los granos se mezclaban con hojuelas de árboles, polvos y piedrecillas, además la presencia de lluvias repentinas hace que los granos se mojen y adquieran humedad y los granos a veces secaban más de un día; por otra parte es importante señalar que si la quinua todavía no ha secado al atardecer si o si se tenía que recoger para evitar que durante la noche este expuesto a lluvias repentinas e incrementa su % de humedad. Es ahí donde marca punto de inicio para buscar métodos de mejorar en la calidad del secado y disminuir la contaminación.

Luego de evaluar varias posibilidades de solución sobre el problema de contaminación se tomó en cuenta también el problema del cuello de botella de la empresa. El cuello de botella que la empresa que presentaba era el secado de la quinua debido a que usaba el secado natural (secado en patios sobre mantadas). Entonces es ahí donde se propuso la construcción de un secador

solar tipo domo o efecto invernadero con la finalidad de mejorar la calidad del grano y optimizar el tiempo de secado.

Los resultados que se obtuvo durante el secado de Fo= 1500 kg de granos de quinua en el secado tradicional fue de 8 horas, mientras que en el secador solar se logró reducir hasta 5 a 6 horas, en cuanto a porcentaje se puede decir que el tiempo se secado se mejoró en un 37.5%.

La eficiencia del rendimiento térmico del secador solar es de 35.6%.

A continuación se muestra los resultados del tiempo de secado logrado con el secador solar.

			materia prima que entra al lavado		Sp (solido portante)	carga húmeda que ingresa al secador solar		producto seco		tiempo se secado	
COLOR	n° de ensayo	espesor de quinua	Fo(Kg)	%H	Kg	F (kg)	%H	W (kg)	%H		
QUINUA BLANCA	1*	1.8	1500	11	1335	1992.54	33	1500.00	11	7h 50 min	8am-3.50pm
	2	1.4	1250	12	1100	1666.67	34	1244.34	11.6	4h 20min	11am-3.20pm
	3	1	1000	11.6	884	1300.00	32	1002.27	11.8	3h	11am-2pm
	4	0.5	750	11.8	661.5	1002.27	34	748.30	11.6	2h 30min	9.30pm-12pm
	5	1.7	1500	11.6	1326	1979.10	33	1503.40	11.8	6h	9am-3pm
	6	1.4	1250	11.4	1107.5	1628.68	32	1255.67	11.8	5h 30min	8am-1.30pm
	7	1.4	1250	11.8	1102.5	1645.52	33	1247.17	11.6		4pm-10am
QUINUA NEGRA	8	1.6	1500	12	1320	1913.04	31	1496.60	11.8		3pm-9am
	9	1.3	1250	11.8	1102.5	1645.52	33	1247.17	11.6	4h 30min	12pm-4.30pm
	10	1.5	1500	11.6	1326	1950.00	32	1503.40	11.8	5.30min	9am-2.30pm

La presente tesis cuenta con 5 capítulos, en el capítulo 1 están todos los aspectos generales justificación, planteamiento y objetivos, en el capítulo 2 está toda la revisión bibliográfica, en el capítulo 3 se habla de materiales y métodos que se usan para la construcción del secador solar tipo invernadero, el cuarto capítulo detalla todo acerca del diseño, construcción y puesta en marcha del secador solar, en el capítulo 5 se muestran las discusiones de los resultados, donde se analizan los datos obtenidos muy detalladamente ; y en la parte final están las conclusiones, recomendaciones y anexos.

INTRODUCCIÓN

Secador solar tipo invernadero, es una estructura cerrada, construida de diferentes materiales, madera, concreto, nylon con protección ultravioleta UV , lamina de policarbonato transparente, etc.; se controla la temperatura, la humedad y otros factores ambientales mediante sistemas de ventilación natural o forzada, para favorecer el proceso de secado de granos, y entre otros; aprovecha el efecto producido por la radiación solar.

El diseño de la secadora depende de varios factores: espacio físico, acceso, la pendiente o desnivel del terreno, ubicación respecto al sol, disponibilidad económica, entre otros.

La presente tesis surge de la necesidad de analizar y proporcionar ideas que solucionen los diferentes métodos de secado para la quinua. El procesamiento de quinua en Wari Group S.A.C. se realiza de una manera tradicional (en patios y mantadas). Es decir al aire libre ateniéndose a las condiciones climáticas y al riesgo de estar en contacto con insectos, animales domésticos, los cuales dañan el producto. Sin embargo, esta producción también se ve afectada por la aparición de las diferentes enfermedades que afectan a la quinua, un mal secado del producto afecta la calidad del grano e influye en el peso del grano, por estas razones no es tan favorable para el productor en términos de volúmenes y niveles de comercialización porque ocasionan pérdidas económicas.

El desarrollo y modernización de los antiguos métodos de secado permite implementar aplicaciones para mejorar la calidad de secado obteniendo un mejor rendimiento en la calidad del grano (buena apariencia) y una disminución significativa de contaminación.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Justificación

Hay muchas técnicas de secado que se han desarrollado con el afán de optimizar y reducir tiempo en el secado de quinua, por ejemplo se ha colocado quinua sobre rejillas que están a cierta distancia del suelo que se cubren con una malla fina para reducir el riesgo de contaminación, otra forma es proteger el patio con una cubierta movable.

Existen tecnologías basadas en el uso de combustibles fósiles; por ejemplo, secadoras con quemadores de diésel o de gas natural, o con gases de combustión de la cascarilla de café. Estas tecnologías presentan inconvenientes de tipo económico y ecológico, debido a los insumos que requieren y a la contaminación que provocan por la combustión. Además, si existen fugas de combustible, gases, humos o cualquier otra sustancia de olor desagradable, la quinua se contamina. Debido a estos problemas que presenta el secado existe la necesidad de desarrollar una tecnología apropiada para secar la quinua haciendo uso de la energía solar para calentar el aire con la finalidad de deshidratar el grano.

La tecnología que se emplea en el secador solar tipo domo es aprovechar la energía solar, protegiendo al grano de quinua del polvo, la basura y los animales, reduce el tiempo de secado y asegura la calidad del grano.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Identificación del problema

La forma tradicional del secado de la quinua en la región de Ayacucho, es al aire libre sobre patios de cemento y mantadas, donde se exponen los granos húmedos directamente a los rayos del sol, durante varias horas, removiéndolo constantemente hasta alcanzar la reducción adecuada de la humedad.

El cuello de botella de la planta procesadora de quinua es el secado ya que se seca con el método tradicional en el patio de cemento en mantadas negras que causa la contaminación por la presencia de polvos, animales, las lluvias repentinas y malogran los granos.

1.2.2. Descripción del problema

El sistema de secado en patio es simple y barato, pero implica mucho movimiento de la quinua pues debe protegerse de lluvias repentinas, del polvo, la basura y los animales; también se debe guardar o cubrir la quinua por la noches para evitar que vuelva a absorber la humedad ambiental. Además en temporada de quinua (cosecha de quinua) no abastece la demanda de la quinua debido a que con el secado en patio demora mucho en comparación que en un secador solar por eso se plantea mejorar el tiempo de secado mediante la construcción de un secador solar tipo invernadero.

1.2.3. Delimitación del problema

El presente trabajo de investigación está limitado a las muestras de quinua de distintas variedades de la región.

1.2.4. Formulación del problema

- **Problema principal**

¿Se podrá diseñar, construir y poner en marcha un secador solar tipo invernadero para mejorar la calidad de granos y que permita reducir el tiempo de secado de la quinua comparado con el secado tradicional en WARI GROUP S.A.C. en Huamanga, Ayacucho?

- **Problema específico**

- ¿Se podrá evaluar el secador solar tipo domo o invernadero, con las condiciones climatológicas de huamanga?
- ¿Se podrá efectuar las pruebas de campo del secador solar tipo invernadero para mejorar el tiempo de secado?
- ¿Se podrá determinar la eficiencia del secador solar tipo invernadero?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo principal

- Diseñar, construir y poner en marcha un secador solar tipo invernadero para mejorar la calidad de granos y que permita reducir el tiempo de secado de la quinua comparado con el secado tradicional.

1.3.2. Objetivo específico

- Evaluar el secador solar tipo invernadero, con las condiciones climatológicas de Huamanga.
- Efectuar las pruebas de campo del secador solar tipo invernadero para mejorar el tiempo de secado.
- Determinar la eficiencia del secador solar tipo invernadero.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- El diseño, construcción y puesta en marcha un secador solar tipo invernadero mejora la calidad del producto comparado con el secado tradicional en WARI GROUP S.A.C. en Huamanga, Ayacucho.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Es posible evaluar el secador solar tipo domo o invernadero, con las condiciones climatológicas de huamanga.
- Las pruebas de campo efectuados en el secador solar mejora el tiempo de secado.
- Es posible determinar la eficiencia del secador solar tipo invernadero.

1.5. Variable e indicadores

Variable independiente

Quinoa que procesa la empresa Wari Group S.A.C

Indicadores:

Cantidad de quinoa a procesar.

Variable dependiente

El secador solar tipo invernadero

Indicadores:

Clima, % de humedad, tiempo de secado

Costos de operación, rentabilidad del proceso

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

En muchos países tales como: Colombia y Guatemala se ha trabajado mucho en cuanto a diseño de secaderos solares. Existen trabajos sobre el diseño y construcción; También existe revisión bibliográfica muy amplia a continuación se detallara algunos textos:

a). A nivel internacional

1."Secadoras solares tipo domo para café pergamino La experiencia en Huehuetenango, Guatemala C.A."

El objetivo que planteó es:

- Mejorar la calidad e inocuidad del café pergamino seco.
- Reducir el tiempo de secado del café comparado con el secado en patio.
- Utilizar de mejor manera la radiación solar para el secado del café.
- Reducir la contaminación provocada por secadoras que funcionan a base de leña, gas u otro combustible.
- Aprovechar mejor el espacio para secado del café.

En sus conclusiones establece:

- ✓ El café obtenido de la secadora solar presenta muy buena apariencia física y está libre de polvo, basura y otros contaminantes.
- ✓ El café que se coloca dentro de la secadora solar, está protegido de la intemperie pero especialmente de la lluvia que puede afectar la calidad física y química de un café de alta calidad.
- ✓ La vida útil de toda la infraestructura de la secadora solar es de aproximadamente 8 años, a excepción del nylon de la cubierta, que tiene entre dos y tres años de vida útil y que tendrá que cambiarse cada vez que este deteriorado.

- ✓ Debe tenerse mucho cuidado con el nylon y evitar que sufra rayones o cortadas porque se deteriora mucho más rápido por el movimiento que le provoca el viento.

2. “Guía técnica de construcción y funcionamiento de secadoras solares tipo domo”

Republica Dominicana

OBJETIVO:

La Asociación Nacional del Café - Anacafé , pone a disposición de los caficultores de Quiché y Huehuetenango, el presente documento. La publicación, pretende mostrar una alternativa novedosa para el secado de café pergamino en dicha región. En esta guía el caficultor encontrará los pasos para construir secadoras solares tipo domo, así como los lineamientos generales para el funcionamiento de las mismas. De acuerdo a los resultados de la investigación, este tipo de secadoras aprovecha el calor del sol, protege el grano de polvo y basura, reduce el tiempo de secado y asegura la calidad del grano. Además, esta tecnología utiliza la radiación solar como energía limpia para calentar el aire, lo que permite deshidratar el grano.

En sus conclusiones establece:

El café obtenido de la secadora solar presenta muy buena apariencia.

- ✓ El café que se coloca dentro de la secadora solar, está protegido de la intemperie pero especialmente de la lluvia.
- ✓ Se logró reducir el tiempo de secado

b). A nivel nacional

1. “Aplicación de simusol en secadores solares: secador solar tipo cabina”, Dr. Luis Sarabia y Lic Fanny Mora Escobar . Tacna

OBJETIVOS

- Determinación del contenido de humedad de la manzana.
- Instalación del ensayo experimental.
- Pre – tratamiento del proceso de secado.
- Las evaluaciones de temperatura del aire, velocidad del aire, porcentaje de humedad del aire y radiación solar se hicieron durante cinco días en horas efectivas de sol, desde las 11 hasta las 16 horas tiempo en que duró el secado de la manzana.

En sus conclusiones establece:

- Mediante la simulación del flujo de calor utilizando el Software SIMUSOL se pueden proponer mejoras en el diseño para el uso de un secador solar tipo cabina con una mayor eficiencia del equipo.
- El uso del software SIMUSOL sirvió para comprender y mejorar el funcionamiento del secador tipo cabina.
- El porcentaje de error en términos de la data el experimental y el modelo simulado es del 3%, lo que valida su aplicación.
- A consecuencia del pronóstico del comportamiento del flujo de calor simulado, se hicieron modificaciones en el diseño del secador tipo cabina con el fin de mejorar el secado del producto, obteniéndose un flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector en promedio de 230,9W, flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara en promedio de 180,2W óptimo para su secado, resultado que también se ve reflejado en la eficiencia del equipo, la que mejoró desde un 27,16% hasta un 45,26%.

C. A nivel local

1. "Determinación del tiempo de secado de la quinua (*Chenopodium quinoa*) usando un secador solar mixto e indirecto en Ayacucho" Omar Vitor Morales 2014, Ayacucho.

OBJETIVOS:

- Determinar el tiempo de secado de la quinua lavada usando un secador solar mixto e indirecto.
- Determinar el tiempo de secado de la quinua lavada usando un secador solar mixto e indirecto, evaluando los parámetros secado solar (velocidad de viento, radiación solar, temperatura y control de la humedad)
- De los ensayos preliminares, determinar el tipo de secador, espesores de lecho a usar, tiempo de secado y evaluar los factores que influyen en el secado solar.
- Evaluar el secado solar mixto e indirecto de la quinua (pérdida de masa, contenido de humedad y velocidad de secado).

En sus conclusiones establece:

- En los cálculos de pérdida de masa, contenido de humedad y velocidad de secado de los granos de quinua (blanca de Junín y pasankalla), en el secador solar mixto e indirecto, la

pérdida de masa y contenido de humedad en el secador mixto fue mayor que en el secador indirecto y esta fue mayor al secado directo. La velocidad de secado en el secador mixto es mayor al secador indirecto, y este es mayor al secado directo.

- En el proceso de determinación del tiempo de secado de los granos de quinua se evaluó diferencias entre los tratamientos, efecto de interacción del **tipo secado por espesor de lecho**, se encontró que el mejor tratamiento fue el tiempo de 165 minutos a un espesor de lecho de 8 milímetros, secador mixto, este fue significativamente superior al resto de tiempos de secado (superior en cantidad de quinua secada, y tiempo de secado aceptable).

2.2. QUINUA

2.2.1. Taxonomía de la Quinua (*Chenopodium quinoa* W.)

Tabla n° 2.1: Clasificación taxonómica de la quinua

Reino	Vegetal
División	Fanerógamas
Clase	Dicotiledóneas
Subclase	Angiospermas
Orden	Centropermales
Familia	Chenopodiaceae
Genero	Chenopodium
Especie	Chenopodium quinoa Willdenow

Fuente: REVELO,A (2011)

2.2.2 Definición de la quinua

La quinua, es un grano andino de la familia Quenopodiáceas, es una especie cultivada y domesticada en el Perú desde tiempos prehispánicos, en la cuenca del Lago Titicaca donde existe la mayor diversidad biológica de este cultivo. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), así como la Organización Mundial de la Salud (OMS), han calificado a la quinua como un alimento único, por su altísimo valor nutricional que permite sustituir las proteínas de origen animal, además por su contenido balanceado en proteínas y nutrientes más cercano al ideal para el ser humano que cualquier otro alimento. (Peralta, 2012, pág. 16)

2.2.3 Características de la quinua

El principal grano andino que se produce y se ha difundido es la quinua, que pertenece a la familia Quenopodiáceas. Su nombre científico es *Chenopodium quinoa*; es una especie domesticada y cultivada desde el Perú prehispánico. La quinua es oriunda de los Andes, por lo que el suelo y clima óptimo para su cultivo es del altiplano y valles altoandinos. Posee proteínas y aminoácidos como la metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina, y contiene casi el doble de lisina respecto a otros granos y cereales. Además, posee vitaminas del complejo B, vitaminas C y E, tiamina, riboflavina y un alto contenido de potasio y fósforo, y lisina en la proteína de la quinua. No contiene gluten, siendo considerado un alimento nutritivo y medicinal (nutraceútico). Este grano andino ha sido catalogado como un alimento único, un superalimento, por organizaciones internacionales como la FAO y la OMS, por su alto contenido nutricional. Su alto contenido de proteínas y nutrientes, responde a los requerimientos de una dieta balanceada para una persona adulta. Asimismo, desde hace unos años ha aumentado la demanda de la quinua en el extranjero, sobre todo la orgánica.

Hay que destacar que la quinua no es un cereal, sino un grano andino. El altiplano es el centro de origen del cultivo, de domesticación y diversificación de las variedades de quinua prehispánicas. Estas culturas no solo domesticaron, sino que también conservaron los diversos tipos de quinua para su aprovechamiento. Desde el punto de vista de su variabilidad genética, puede considerarse como una especie oligocéntrica, con centro de origen de amplia distribución y diversificación múltiple, siendo la región andina y dentro de ella, las orillas del Lago Titicaca, las que muestran mayor diversidad y variación genética. (Fairlie Reinoso)

2.2.4. Valor nutritivo del grano de la quinua

Existen alimentos con un alto contenido de proteínas, por ejemplo, la soya, el chocho, etc., pero la quinua supera a aquellos de consumo masivo como son: trigo, arroz, maíz, cebada y es comparable con algunos de origen animal: carne, leche, huevo, pescado. Pero el verdadero valor de la quinua se encuentra en la calidad de la proteína, es decir, en la presencia de un buen balance de aminoácidos esenciales, como son: lisina, metionina y triptófano especialmente. La cantidad de proteína puede variar entre 14 y 20%. Además

posee excelentes cantidades de minerales como: calcio, hierro y fósforo y algunas vitaminas. (Peralta I, 2011)

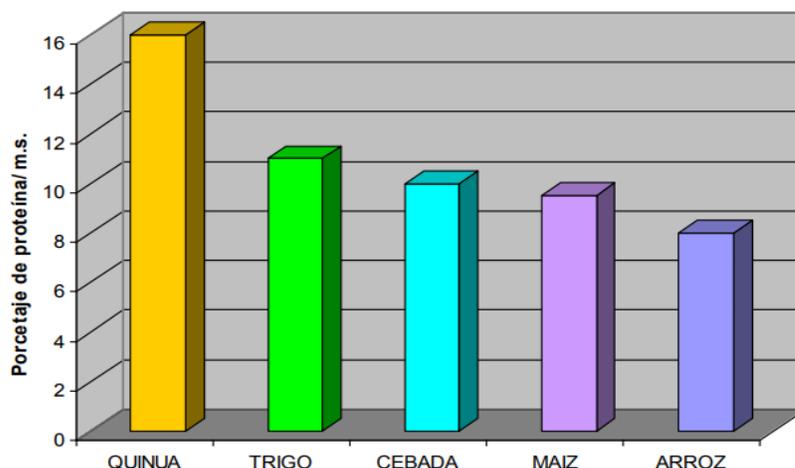


Figura n° 2.1: Valor comparativo de la proteína de quinua con otros cereales.

Fuente: (Peralta I, 2011)

La quinua por su gran poder nutricional, provee las proteínas y los aminoácidos esenciales para el ser humano como la metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina. La concentración de lisina en la proteína de la quinua es casi el doble con relación a otros cereales y gramíneas. Contiene las vitaminas del complejo B, vitaminas C, E, tiamina, riboflavina y un alto contenido de potasio y fósforo, entre otros minerales. El valor calórico es mayor que otros cereales; en grano y harina alcanza 350 calorías/100 g.

Tabla n° 2.2: Características alimenticias de la quinua (%)

Grano	Proteína	Grasa	Fibra	Carbohidratos
Quinua	12.6 – 17.8	6.6 – 8.5	3.5 – 9.7	54.3 - 73
Trigo	8.8	1.5	3	73.7
Arroz	9.9	1.6	0.7	74.2
Maíz	9.2	3.8	9.2	65.2

Fuente: *Pregón Agropecuario, Argentina*

2.2.5. Características Productivas

Para producir quinua, los productores utilizan parcelas que fueron usadas para sembrar papa, por lo general en épocas y presencia de lluvias. Los productores utilizan métodos de siembra al voleo, siendo más eficiente realizar surcos que pueden realizar en forma mecanizada o manual. El cultivo tiene una amplia adaptación agroecológica, pero las condiciones óptimas son entre 3,000 y 4,000 m.s.n.m. (Peralta, 2012)

2.2.6. Localización de la producción de quinua en el Perú

En el Perú la quinua se cultiva en 19 de los 24 departamentos, principalmente en la Sierra y en la Costa, existiendo en la zona andina por lo menos cinco centros de concentración: el Callejón de Huaylas, Junín, Ayacucho, Cusco y el Altiplano de Puno. En la Costa el cultivo ha sido introducido durante los últimos diez años iniciándose en Arequipa y difundiéndose hacia el centro y norte del país.

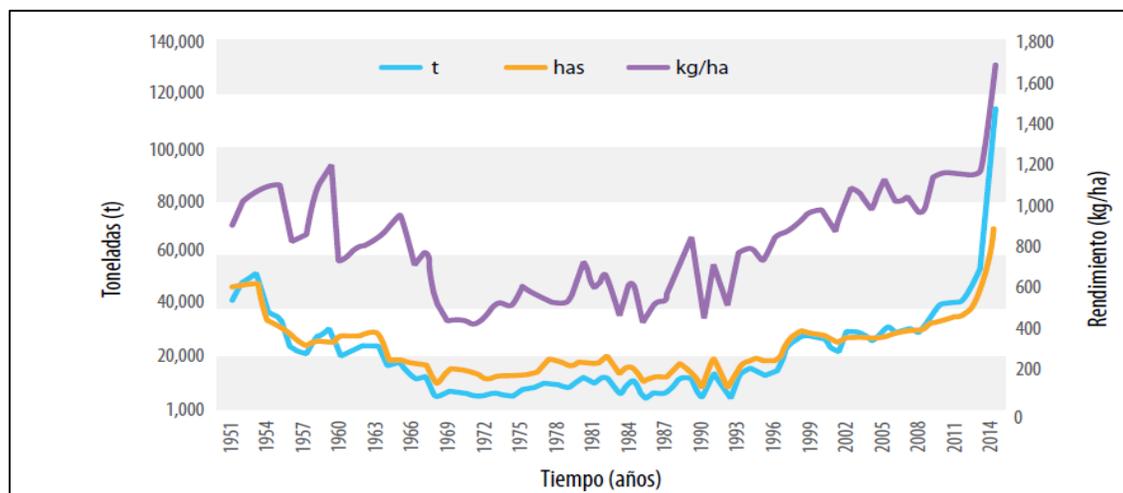


Figura n° 2.2: Producción de quinua en el Perú (1950-2014)

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego.

Dpto.	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Tasa de crecim.
Puno	15484	24902	24542	22102	27719	24652	25667	22691	31160	31951	32740	30179	29331	36158	6.7%
Arequipa	278	286	284	269	257	268	281	264	473	650	1013	1683	5326	33137	44.4%
Ayacucho	1144	752	1070	914	1031	1368	1209	1721	1771	2368	1444	4188	4925	10323	18.4%
Junín	1683	1599	1506	1366	949	1049	1096	1145	1454	1586	1448	1882	3852	10528	15.1%
Cusco	1274	876	661	614	796	1075	1493	1776	2028	1890	1796	2231	2818	3020	6.9%
Apurímac	1006	621	613	518	585	894	934	904	960	1212	1262	2095	2010	2877	8.4%
La Libertad	460	350	416	437	258	305	255	364	415	430	354	505	1116	4006	18.1%
Huancavelica	115	75	71	41	122	148	173	275	412	358	429	501	671	801	16.1%
Huánuco	249	351	306	281	323	305	295	296	303	286	293	306	389	1157	12.5%
Ancash	398	382	456	328	379	180	234	199	158	148	140	183	347	3241	17.5%
Cajamarca	113	114	104	77	131	141	151	195	227	133	141	190	219	438	11.0%
Moquehua	24	23	24	21	16	30	20	22	28	23	25	11	26	112	12.6%
Amazonas	41	42	32	30	23	13	18	14	9	2	2	2	15	16	-7.0%
Ica										40	41	69	58	966	27.8%
Tacna											52	187	360	2376	34.2%
Lambayeque													427	3248	16.9%
Lima													202	1718	17.9%
Pasco														1	
Piura														220	
Total	22269	30373	30085	26998	32589	30428	31826	29866	39398	41077	41180	44212	52092	114343	13.4%

Figura n° 2.3: Producción de quinua (en ton) por regiones (2001-2014)

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego.

2.2.7. Formas de Presentación de la Quinua

Este producto se puede presentar en diversas condiciones:

- **Quinua limpia:** libre de impurezas y clasificada.
- **Quinua perlada:** el grano limpio se somete a un proceso mixto (escarificado y lavado) para eliminar casi toda presencia de saponina (0.06%). Mantiene características proteicas. Humedad de 8 a 11%.
- **Harina:** se obtiene de la molienda y tamizado de la quinua lavada.
- **Hojuelas:** se obtiene del laminado de la quinua lavada.
- **Pop o pipocas:** se obtiene mediante un proceso de expandido de la quinua lavada.
- **Otros derivados:** barras energizantes y como ingrediente para chocolates.

Los principales usos y consumo de la quinua:

- **Grano:** en preparación de sopas, guisos, graneados, purés, postres y bebidas.

- **Harina:** en panificación, galletas, postres, dulces, bebidas, elaboración de fideos mezclado con otras harinas, ingrediente de salchichas y albóndigas.

- **Hojuelas:** bebidas, sopas, dulces.

- **Pop o Pipocas:** para uso directo solo o con yogurt, helados, postres y chocolate. El grano de quinua esencialmente es usado como alimento y en menor medida para fines medicinales, las formas de consumo son en grano, hojuelas, harina, así como también en pastas, cereal y en barras de chocolate. Como subproducto forraje para animales y leña. (Mena Reinoso, 2015)

2.3. SECADO

La práctica de secamiento tiene por objetivo disminuir el agua del grano de la quinua previamente lavado y centrifugado de una forma natural o mecánica, a un punto comercialmente aceptado que reúna las características adecuadas (% humedad 11 a 12). (Asociacion Nacional de cafe, 2006).

2.3.1. Proceso de secado

La eliminación del contenido de agua dentro de un producto alimenticio tiene dos subprocesos:

1. Transferencia de la humedad interna del sólido hacia la superficie del mismo y su posterior evaporación. Aquí se presenta el movimiento de la humedad en función de la naturaleza física del sólido, su temperatura y su contenido de humedad (agua)
2. Transferencia de energía en forma de calor del ambiente que rodea al sólido para evaporar la humedad de su superficie. En este subproceso se tiene como función de las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo de aire, presión, área de exposición y el tipo de secador empleado.

Los subprocesos mencionados son un factor limitante que gobierna la velocidad del secado, por lo que los dos subprocesos ocurren simultáneamente durante el secado, se tiene que el secado es medido como la pérdida de humedad como una función del tiempo. (Mena Reinoso, 2015)

Se tiene tres periodos en el proceso de secado: en el periodo inicial como se aprecia en la Figura 2.4 la curva A-B, de calentamiento (o enfriamiento) inicial del sólido normalmente de poca duración, la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. Al terminar este primer periodo el secado toma una forma lineal de tipo $x = f(t)$, la velocidad de secado es

constante (recta B-C), que se la conoce como el periodo de velocidad de secado constante. El secado se mantiene igual por un periodo de tiempo hasta llegar a un punto crítico (punto C) donde la línea recta tiende a curvarse y a formar una asíntota con el contenido de humedad X_{eq} , donde es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado, en la figura 2.4 es el punto E. A la curva C-E se denomina como el periodo de caída de velocidad del secado. (S. Mujundar, 2000, págs. 1-9)

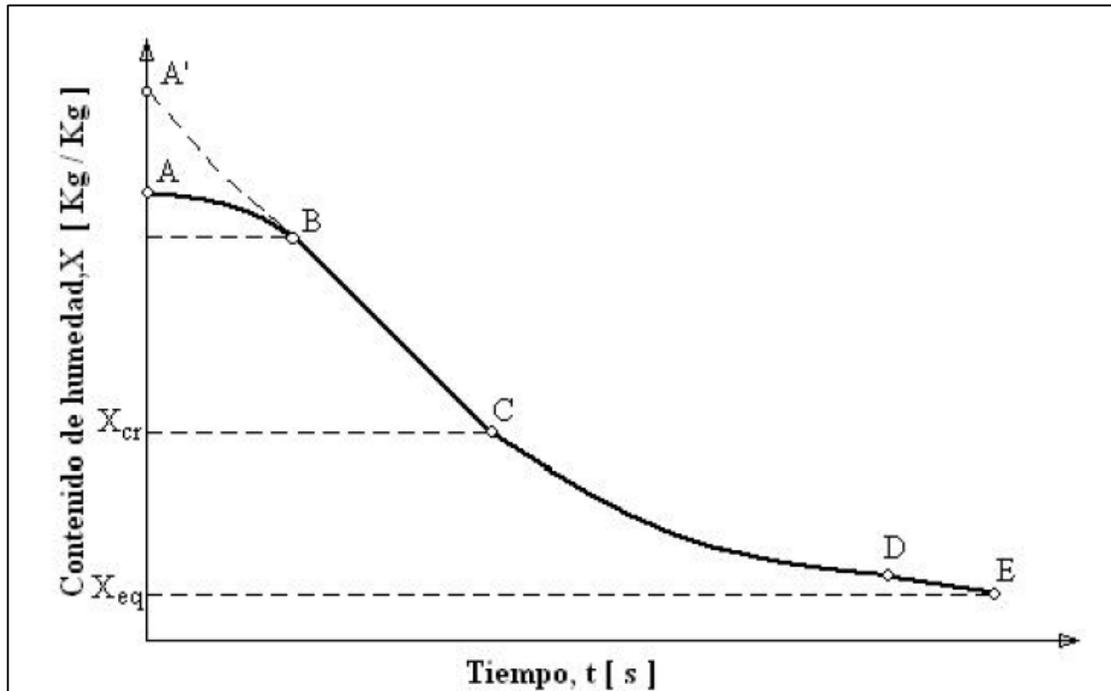


Figura n° 2.4: Curva de secado

Fuente: (S. Mujundar, 2000)

2.3.2. Tiempos de Secado

En el tiempo total de secado deben de considerarse tres períodos distintos:

Primer Período:

Es este período de calentamiento inicial del producto en el cual la velocidad de secado en función del tiempo aumenta.

Segundo Período:

Es este lapso la velocidad de secado permanece constante y es independiente del sólido, de modo que para las mismas condiciones externas, el proceso es similar al que se daría en la superficie de una masa de agua.

Tercer Período:

Una vez que la humedad superficial ha sido eliminada, la humedad interna remanente comienza a ser eliminada pero, en consecuencia, la velocidad del secado decrece a medida que se va perdiendo humedad interna por evaporación en la superficie.

Las duraciones de los períodos de secado varían de un secador a otro y de un producto a otro, de tal forma que es en la práctica donde se fijan estos valores. Al disminuir la cantidad de humedad a evaporar también disminuye el tiempo de secado; otra opción de disminuir el tiempo de secado es la de aumentar la energía térmica, para que aumente la temperatura del aire y así aumente la tasa de transferencia del calor necesario para evaporar la humedad del producto. Si se quiere disminuir el tiempo de secado se debe tener cuidado de que la temperatura del aire no sea demasiado alta, ya que puede ocasionar daños al producto a secar. (Almansa & Muñoz, 1994)

a). Ecuaciones de Tiempo de Secado

El tiempo de secado depende del material, esta es una característica importante en la construcción de la curva de secado y se suele separar el tiempo tanto para el primero y segundo periodo de secado. La siguiente ecuación permite obtener el tiempo de secado, la misma que se parte de la definición de la velocidad de secado.

$$\int_0^d dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{w_D} \quad (2.1)$$

Donde X_1, X_2 son el contenido de humedad desde el tiempo cero al tiempo t , w_D es la velocidad de secado, m_s es la masa seca y A es el área de secado.

La ecuación número 1 nos permite calcular por separado el tiempo de secado tanto para el periodo constante de secado como para el periodo de caída de secado. (Mena Reinoso, 2015, pág. 15)

b). Modelos Matemáticos

Un modelo constituye una representación que describe simplificadaamente el comportamiento de un fenómeno, experimento o un objeto real. Se constituye en la herramienta principal utilizada en la estadística por su versatilidad de representación de problemas situaciones de la vida.

Los modelos pueden ser representaciones físicas, gráficas y simbólicas o matemáticas. Los modelos físicos se usan principalmente para hacer simulaciones. Se llama simulación a un experimento realizado sobre el modelo de un sistema. (Mena Reinoso, 2015, pág. 16)

Modelo de Page

Page, propuso una ecuación para el secado de capa delgada de material, deducida de la ecuación de enfriamiento de Newton, en la que obtenemos la relación de contenido de humedad (MR).

$$MR = \left[\frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \right] = e^{q \cdot t^n} \quad (2.2.)$$

Dónde: q y n son las constantes del secado que dependen de la temperatura del medio secante y el tipo de material, M_t , M_e , M_i son el contenido de humedad a una temperatura en un tiempo t, humedad del medio, humedad inicial respectivamente; q y n pueden ser calculados mediante la ecuación (3)

$$\ln \left[-\ln \left[\frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \right] \right] = \ln q + n \ln t \quad (2.3)$$

Graficando la ecuación (3) en coordenadas logarítmicas, la relación de humedad con respecto al tiempo, se aprecia una línea recta y a partir de ella se pueden determinar los valores de q y n.

2.3.3. Curva y Velocidad de Secado

Cuando el contenido de humedad promedio ha alcanzado el contenido crítico de humedad, significa que la capa de humedad de la superficie ha sido casi evaporada.

El contenido final de humedad, determina el tiempo de secado y las condiciones requeridas para el proceso de secado. Las restricciones de temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso, resulta debido a la degradación, decoloración, manchado, flamabilidad (provocada principalmente por polvos) y otros factores que afectan al alimento. (S. Mujundar, 2000)

Se considera que un proceso de secado es óptimo cuando el tiempo de secado es el mínimo, con un mínimo uso de energía, lo que indica que tiene una relación estrecha con la eficiencia energética del secador empleado. (S. Mujundar, 2000).

Al poner en contacto una carga de sólido húmedo con una corriente gaseosa caliente en condiciones controladas, se puede reportar la disminución gradual del peso de los sólidos en el transcurso del tiempo, como una respuesta a la pérdida de material debido a la evaporación y eliminación gradual del líquido contenido en el sólido, la cual da lugar a las curvas de secado así como a la determinación de los periodos de secado y la velocidad de secado.

Debe admitirse que durante el secado, la matriz sólida o sólido seco portante se mantiene constante, solamente disminuye gradualmente la masa de líquido; por lo tanto la humedad del sólido disminuye gradualmente hasta el límite extremo de la humedad en equilibrio. (Arias, 2011, pág. 338)

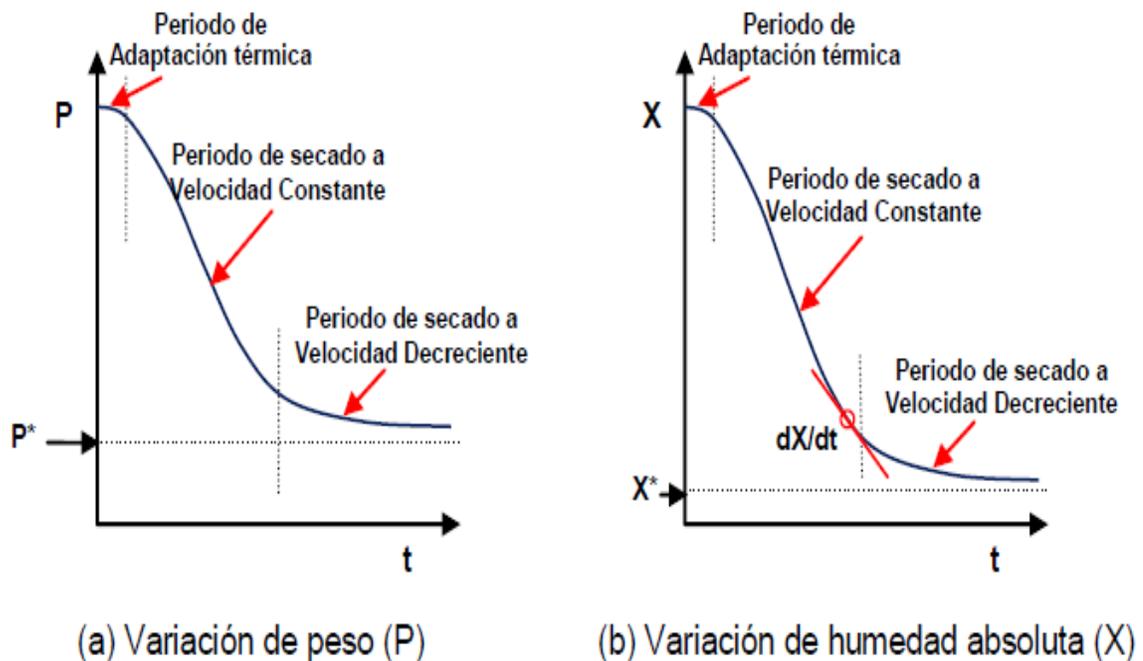


Figura n° 2.5: Curvas típicas de secado de materiales sólidos

(Arias, 2011, pág. 338)

Una curva típica de secado de un material sólida presenta tres periodos:

1. Adaptación térmica
2. Secado a velocidad constante

3. Secado a velocidad decreciente

Normalmente el primer periodo es irrelevante; el **periodo de secado a velocidad constante** se caracteriza porque la tasa de pérdida de líquido por parte del material sólido se mantiene aproximadamente constante conforme transcurre el secado, fenómeno que se presenta cuando existen abundante líquido libre en el material sólido; mientras que, el **periodo de secado a velocidad decreciente** se caracteriza por la disminución gradual de la tasa de eliminación del líquido, con una reducción progresiva de la evacuación del líquido desde la región intrapartícula del sólido, debido a la resistencia migracional del líquido, ya sea por la capilaridad o la difusión poral. (Arias, 2011, pág. 338)

Velocidad de secado

La velocidad de secado es una expresión de la tasa de líquido eliminado desde el sólido por evaporación en un intervalo de tiempo y por cada unidad de área o superficie de secado disponible, que podía entenderse como el flujo másico de líquido eliminado por cada superficie unitaria de secado. Su expresión es:

$$R = -\frac{S_p}{A} \frac{dX}{dt} \quad (2.4)$$

Donde:

S_p : Matriz sólida o sólido seco portante [kgS]

A : Área o superficie de exposición al secado [m²]

X : Humedad absoluta del sólido [kgA/kgS]

t : Tiempo [s]

dX/dt : Gradiente de humedad absoluta

Como el sólido seco y el área de secado se mantienen constantes durante la operación de secado, el cálculo de la velocidad de secado: R , variará de acuerdo al gradiente de humedad absoluta, que se determina como pendiente en la curva de secado: X vs t , representado en la Fig. 2.5 (b). Por lo tanto, son mucho más prácticas las curvas de secado de la velocidad de secado, las cuales pueden ser de tiempo vs velocidad de secado: t vs R , o el de humedad absoluta vs velocidad de secado: X vs R tal como se muestra en la figura n° 2.6 (Arias, 2011, pág. 339)

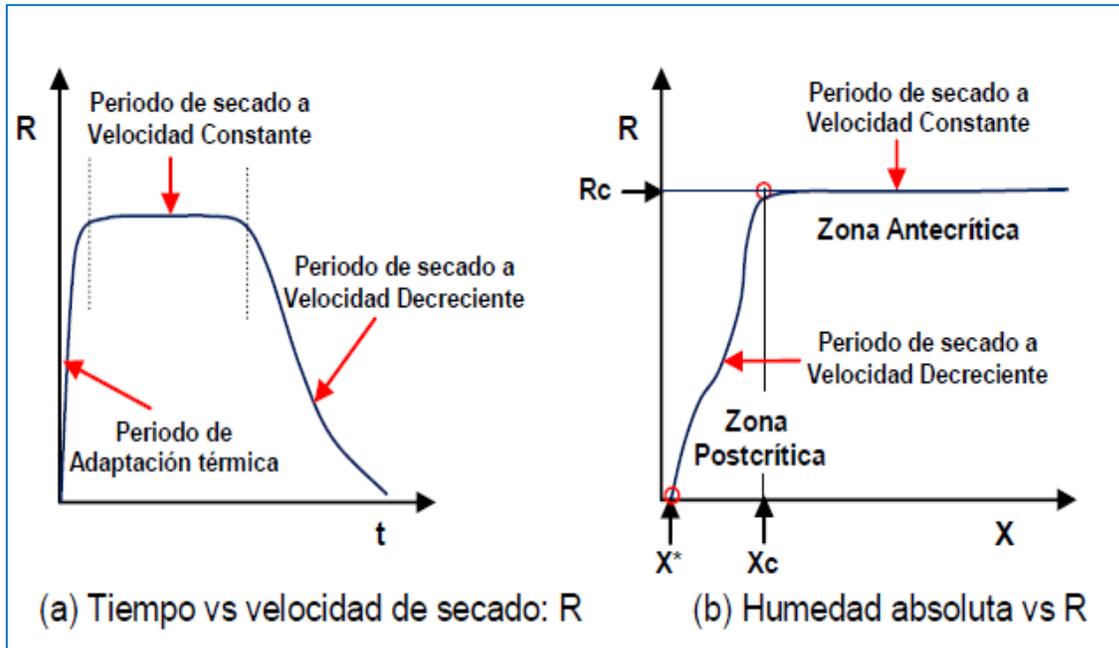


Figura n° 2.6: Curvas de velocidad de secado de materiales sólidos

(Arias, 2011, pág. 340)

En los diagramas de velocidad de secado si se puede observar claramente la tendencia invariable (horizontalidad) del periodo de secado a velocidad constante, así como el decaimiento del periodo de secado a velocidad decreciente. La curva de X vs R tiene una gran importancia que consolida los principales parámetros de la velocidad de secado que son la humedad crítica: X_c , y la velocidad de secado constante: R_c , determinados en el punto de inflexión denominado punto crítico o frontera entre los dos periodos fundamentales de secado que son el de velocidad de secado o zona antecrítica y el de velocidad decreciente o zona postcrítica.

El punto crítico no es una propiedad específica del material sólido a secarse (con la densidad, conductividad, etc), puede variar de acuerdo a la variación de los factores de secado. El periodo antecrítico se describe con una regresión horizontal, determinando R_c ; mientras que el periodo postcrítico puede ser una función múltiple, de acuerdo al tipo del material sólido sometido a secado, como son granulares, porosos, pastas, etc, pero en muchos casos puede tender a una conducta ideal representado por una función lineal entre el punto crítico y el punto de equilibrio. (Arias, 2011, pág. 340)

2.3.4. Factores que influyen en el proceso de secado

a). Humedad relativa del aire

Es la relación entre la presión de vapor de agua en las condiciones actuales y la presión de saturación (máxima) de vapor de agua a la misma temperatura. A menor contenido de humedad en el aire, mayor será su capacidad de absorción de agua. (Besora Magem, 2010)

b). Humedad de los granos

En la operación de secado, es importante controlar la humedad del producto en función del tiempo y temperatura de secado; al producto no le podemos extraer toda su humedad porque se estaría afectando la naturaleza (desnaturalización) y por lo tanto, cambiarían sus propiedades. (Muñoz & Cabrera, 2006)

c). Temperatura

A mayor temperatura la energía cinética de las moléculas de agua localizadas en la superficie del grano aumenta, y será suficiente para vencer las fuerzas intermoleculares de la fase líquida, y en consecuencia, evaporarse. La temperatura también afecta a la humedad relativa del aire, ya que a mayor temperatura aumenta la presión de saturación de vapor de agua, por lo tanto, mayor margen de captación de agua. (Muñoz & Cabrera, 2006)

d). Velocidad del aire

El movimiento del aire tiene como funciones, transmitir el calor al agua del grano para su evaporación, y transportar esta agua evaporada. A mayor velocidad, mayor renovación de aire y más rápido será el transporte del agua evaporada. De esta manera, con todo lo comentado, el funcionamiento del secador solar tipo invernadero se puede explicar de la siguiente manera: El aire del interior del secador es calentado por el sol, aumentado su punto de saturación y así poder absorber la humedad de los granos, y le provoca movimiento de convección al reducir su densidad. El aire con menor densidad, cargado de agua y más caliente, saldrá por la apertura del techo y entrará aire nuevo de menor temperatura, menor contenido de agua y más frío, por el espacio del suelo. Este funcionamiento de circulación del aire solo es posible en equipos pequeños donde la velocidad del aire puede llegar a valores entre 0,5 y 1 m/s. En equipos grandes, no llega a los 0,3 m/s, requiriendo así una circulación forzada. (Muñoz & Cabrera, 2006)

Existen trabajos sobre la medición de la velocidad del viento en la ciudad de Huamanga, que a continuación se muestra:

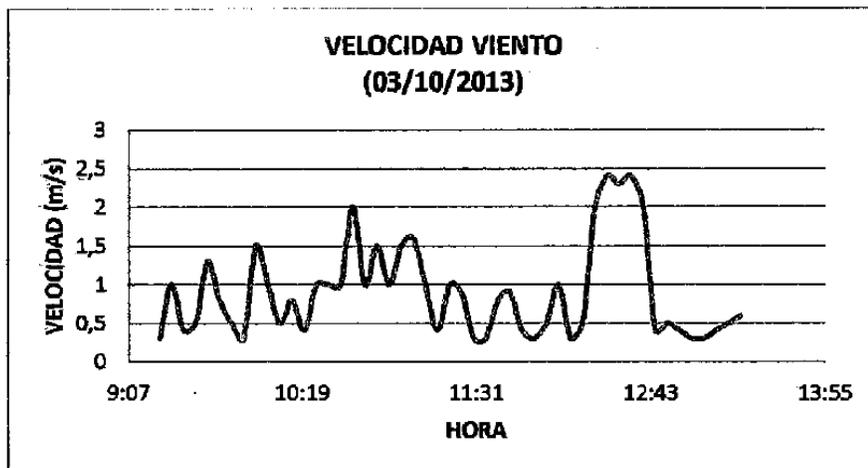


Figura n° 2.7: Variación de la velocidad (9am-2pm)

(VITOR, 2013, pág. 56)

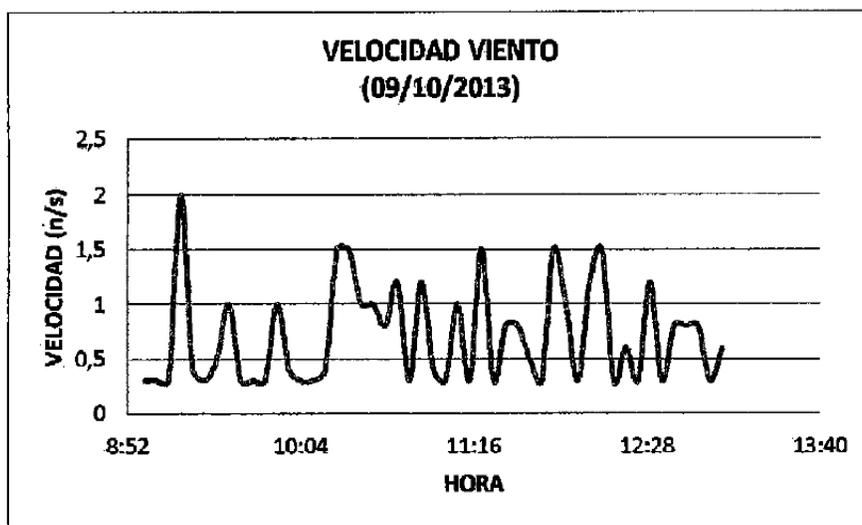


Figura n° 2.8: Variación de la velocidad del viento (9am-2pm)

(VITOR, 2013, pág. 57)

2.3.5. El punto de secado en la quinua

Si la quinua centrifugada se seca deficientemente, se obtiene una quinua dañada que se vende a un precio más bajo en el mercado. Si la quinua se seca mucho, pierde peso. Si a la quinua le falta secado, aparecen terroncitos y manchas por exceso de humedad en la superficie de los granos y se generan mohos en las partes almacenadas.

Para determinar el punto de secado ya sea en patio o en secadora solar, pueden realizarse las siguientes pruebas:

- **Visual**

Consiste en tomar una muestra de quinua y observarla para ver su color característico, en la quinua negra y roja es muy notorio ver si la quinua ya está seca; en la blanca es un poco complicado debido a que la variación de color no es muy notorio.

- **Con el diente**

Se toman algunos granos de diferentes puntos de la partida en proceso de secado y se presan con los dientes, si queda la marca de los dientes, indica que ya está de punto; si el diente se hunde, el grano está muy húmedo y si al grano no le queda ninguna seña, está reseco.

- **Determinación con aparatos.**

Existen aparatos que permiten la medición rápida del contenido de humedad de los granos, en este caso se usan los higrómetros.

2.3.6. El secado en patio de cemento.

El uso de los patios de cemento para el secado de granos es el sistema tradicional y el más conocido entre los productores, aunque también puede observarse en raras ocasiones, el secado sobre nylon de polietileno.

Ventajas

- a) Se usa energía limpia por medio de la radiación solar.
- b) No causa contaminación
- c) Operación sencilla y cualquier persona puede hacer las actividades.
- d) El producto final es de buena calidad.

Desventajas

- a) Se depende de las condiciones del clima
- b) La pérdida de la humedad puede no ser constante.
- c) Es muy tardado si no hay suficiente radiación solar.
- d) La construcción de los patios puede resultar muy costosa.

- e) El movimiento de la masa del grano debe ser constante y se necesita mucha fuerza.
- f) Existe riesgo de contaminación con el polvo, basura y animales.
- g) Durante la noche puede absorber nuevamente humedad si no se resguarda. (Moreno)

2.4. LA ENERGÍA DEL SOL

La energía solar viene a ser el origen fundamental de la mayoría de las energías aprovechables existentes como: la energía para el calentamiento directo, la energía del viento, la energía hidráulica y la energía derivada de los combustibles fósiles, que es una consecuencia del proceso de fotosíntesis mediante el cual las plantas convierten la energía solar en química. Una buena comprensión de la tecnología de la energía solar a través del análisis de la radiación solar.

Para el secado de los granos, es importante aprovechar de la mejor manera la energía del sol en forma de calor. Esta energía podemos obtenerla todo el tiempo, no contamina, es gratuita y es para todos. La cantidad y la intensidad de los rayos del sol que llegan a la tierra dependerán de varios factores:

- La posición del sol en relación con la tierra, esto cambia según la época del año.
- Las condiciones del cielo: nubes, viento, lluvia, humo, etc

Es importante entonces, aprovechar al máximo la energía del sol que en conjunto con el viento, ayuda a remover la humedad de los granos. (Berrueta Soriano, 2004)

2.4.1. Emisión radiactiva desde el sol

Considerando el sol como un cuerpo negro a la temperatura T , la radiación del flujo emitido por la superficie solar puede ser representada por la distribución de Planck.

Aplicando la ley de Wien para la emisión máxima se obtiene que corresponde a una longitud de onda de $0.5 \mu\text{m}$, y el flujo total emitido por el sol, mediante la ley de Stefan Boltzman, es $6.416 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ en su superficie y es una radiación difusa en todas direcciones, como la distancia tierra-sol es bastante grande y la potencia emisiva está dentro de una superficie esférica, la intensidad varía inversamente al cuadrado de la distancia, y se obtiene de 1383 W/m^2 , valor conocido como constante solar. En los últimos años se determinó 5760

como la temperatura del sol en K, la que da una constante solar de 1352 W/m^2 , fuera de la atmosfera. (Aronés, pág. 14)

El piramómetro es el instrumento usado para la medición de la radiación solar global, pudiendo ser de diferentes tipos:

a). Fotovoltaico:

El sensor es una celda fotovoltaica de silicio, que se encarga de transformar la radiación incidente (W/m^2) en una señal eléctrica (mA). Es diseñado para que la fotocorriente generada es proporcional a la intensidad de la radiación, éstos dan respuesta inmediata (instantánea) y son económicos. Según la WMO (Organización Meteorológica Mundial) éstos son recomendables para estaciones meteorológicas. (Aronés, pág. 15)

b). Fototérmicos

Los Sistemas fototérmicos convierten la radiación solar en calor y lo transfieren a un fluido de trabajo.

Basado en el calentamiento del sensor por radiación solar, el cual es traducido en una señal mecánica o eléctrica. Uno de las más simples es el actinógrafo según ROBITZSCH (Piranógrafo), basado en la propiedades termoelásticas distintas de dos materiales. El tiempo de respuesta es aproximadamente de 5 minutos y es necesario calibraciones por lo menos cada año. (Aronés, pág. 15)

2.4.2. Estimación de la radiación solar

La estimación de la radiación solar incidente sobre una superficie en lugar y fecha determinados se realiza usando las expresiones siguientes (Aronés, pág. 16)

$$H_{av} = H_o * \left(a + b * \frac{n}{N} \right) \quad (2.5)$$

H_{av} Radiación solar global sobre superficie horizontal para el periodo de estudio

H_o Radiación solar extra atmosférica promediada para el mismo periodo.

a y b Constantes experimentales propias del lugar

n Número efectivo de horas de brillo de solar.

N El número de horas de brillo solar máximo posible (calculado).

La radiación promedio extra atmosférica se estima con:

$$H_o = 24 * I_{sc} * \frac{(\cos \varphi \cos \delta \text{sen} \omega_s + \frac{2\pi \omega_s \text{sen} \varphi \text{sen} \delta}{360})}{\pi} \quad (2.6)$$

Donde: I_{sc} : Constante solar horaria para un día determinado del año.

$$I_{sc} = I_o \left(1 + \frac{0.033 \cos 360 * d}{365} \right) \quad (2.7)$$

I_o : Constante solar = $1352 \frac{w}{m^2}$ d : día del año

El número de horas de brillo solar máximo se estima con:

$$N = \frac{2 \text{ arc cos}(-tg\varphi * tg\delta)}{15} \quad (2.8)$$

El ángulo horario $w_s = \text{arc cos}(-tg\varphi * tg\delta)$ (2.9)

Declinación del sol (δ):

Es el ángulo que forma el vector posición tierra-sol con el plano ecuatorial, este varía con el día de año 23.5° para los solsticios de verano e invierno respectivamente, su valor se determina con la ecuación aproximada de Cooper.

$$\delta = 23.5^\circ \text{ sen} \left[\frac{360 * (284 + d)}{365} \right] \quad (2.10)$$

Dónde: d día del año a partir del 1ro de enero.

Latitud de una localidad (φ)

Es el ángulo formado por el vector posición localidad-centro de la tierra con el plano ecuatorial. Para el hemisferio norte es positivo y negativo para el hemisferio sur.

Longitud de una localidad (L)

Es el ángulo que forma la proyección del vector posición localidad-centro de la tierra sobre el plano ecuatorial con el meridiano que pasa por el Greenwich (Inglaterra).

2.4.3. Energía solar en el Perú

El adecuado aprovechamiento de la energía solar en cualquier lugar requiere una evaluación de éste recurso, para lo cual es necesario estaciones meteorológicas con instrumental apropiado (solarímetros).

El SENAMHI institución encargada de tomar el registro de los parámetros meteorológicos, solo registran datos de temperatura (media, máxima y mínima), humedad, horas de brillo solar y velocidad del viento en algunas ciudades importantes como el distrito de Ayacucho, descuidando la medición de la radiación solar, parámetro más importante en la construcción de equipos solares. (Kadono, 1799)

El ing. César Kadono utilizando fórmulas empíricas ha elaborado mapas solares y confeccionando tablas de radiación para distintas localidades del Perú.

Tabla n° 2.3: Radiación solar promedio en el Perú

Departamento	Promedio Anual (<i>cal/cm². dia</i>)
Arequipa	579
Puno	570
Huancayo	554
Ayacucho	510
Moquegua	500
Chiclayo	445
Ica	441
Cusco	433
Trujillo	410

Fuente: (Kadono, 1799)

Para determinar la radiación global en Ayacucho se utiliza la ecuación 2.4 , siendo necesario determinar las constantes experimentales a y b, éstas se obtienen por regresión lineal después de hacer mediciones de n y H_{av} , a demás estimar H_0 y N para los periodos. En la tabla n° 2.4 se dan los valores de a y b para Ayacucho y cualquier otra región del Perú con características geográficas y climáticas similares. (Aronés, pág. 19)

Tabla n° 2.4: Valores de las constantes a y b para Ayacucho

Mes	a	b
Enero	0.394	0.556
febrero	0.477	0.352
Marzo	0.432	0.472
Abril	0.429	0.481
Mayo	0.526	0.274
Junio	0.480	0.342
Julio	0.384	0.451
Agosto	0.383	0.466
Setiembre	0.465	0.416
Octubre	0.429	0.438
Noviembre	0.412	0.453
Diciembre	0.429	0.434

Fuente: (Ambrosetti, 1979)

2.4.4. Radiación solar en Ayacucho

Existen trabajos sobre mediciones de la intensidad de la radiación solar realizadas en la region de Ayacucho. A continuación se presenta datos de reporte sobre la intensidad de radiación solar:

La intensidad de radiación solar promedio de esos meses es $650 \frac{w}{m^2}$

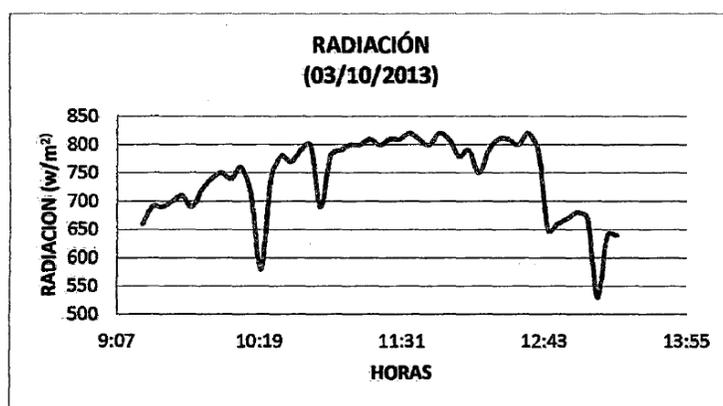


Figura n° 2.9: Variación de radiación (03/10/2013). Huamanga
(VITOR, 2013, pág. 53)

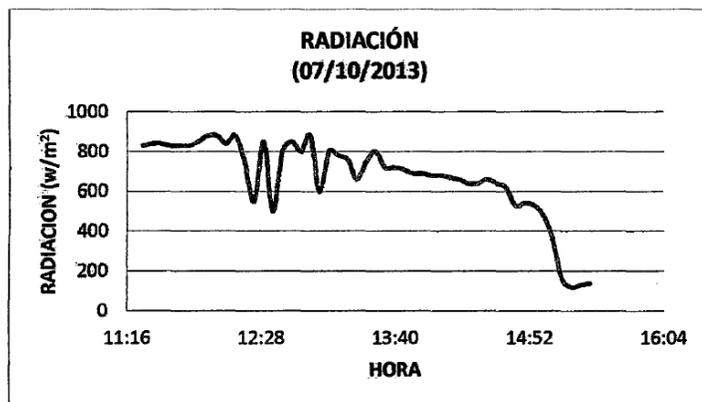


Figura n° 2.10: Variación de radiación (03/10/2013). Huamanga
(VITOR, 2013, pág. 54)

2.5. SECADORES SOLARES

El secador solar se caracteriza para secar los alimentos (frutas, vegetales, etc.) principalmente para mejorar la calidad del producto, evita que el daño que tiene la fruta por los insectos y microbios desaparezcan.

Los dos elementos básicos de una secadora solar son:

- a) El colector: Donde la radiación solar calienta el aire, y
- b) La cámara de secado: Donde el producto es deshidratado por el aire que circula.

Estos dos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a diferentes equipos de secadora solar. (Moreno)

2.5.1. Secadores de granos

En la actualidad existen numerosos tipos y diseños de secadores de granos para alimentos, cada uno de ellos tiene su particularidad y obedece a condiciones tales que favorezcan a una u otra condición dentro del proceso de secado, sin duda la elección de uno u otro tipo de secador se relaciona con la economía y eficiencia del proceso, y que generalmente estas dos variables se contraponen en los distintos tipos de secado. Podría decirse que un secador que resulta más económico o que su proceso es más económico, dará como resultado baja eficiencia del producto seco. Por el contrario al aumentar los costos del equipo aumentará la eficiencia del mismo, es decir aspectos fundamentales que deben tomar en cuenta al momento de la elección

de un tipo específico de secador. En América Latina, una parte importante de la producción de granos se seca todavía en forma artesanal, es decir, se seca en el campo durante largos períodos. El uso de esta técnica acarrea elevadas pérdidas de producción, puesto que los granos quedan expuestos, durante lapsos prolongados, a condiciones adversas y presencia de depredadores. (Soria, 2006)

Los tipos de secadores que se usan son:

- a) Secado artificial con GLP
- b) Secado natural
- c) Secado natural en tendales

2.5.2. Tipos de secadores solares

Considerando lo anterior, se pueden definir tres diferentes tipos de secadores solares:

a). Secadora solar indirecta

En este tipo de secadero, la radiación solar no incide directamente sobre el producto a secar. El aire se calienta en un calentador solar y es conducido a la cámara de secado para deshidratar el producto. Generalmente se utilizan como colectores placas solares para calentar el aire en aplicaciones que utilizan baja y moderada temperatura. La eficiencia de estos calentadores depende del diseño y de las condiciones de operación. (Larios Saldaña, 2004)

En la (Fig. 10) aparece el esquema de un secadero de este tipo. El material a secar se coloca sobre bandejas perforadas situadas unas encima de otras. El aire del ambiente se calienta con una placa absorbidora, unido al fondo de la caja y fluye por sí solo al espacio de secado. La operación de los secadores solares es muy simple y no requieren casi nada de mantenimiento. De cualquier manera se recomienda. Mantenerlo limpio y seco, para que el calor y la luz puedan ser absorbidos correctamente. (Larios Saldaña, 2004, pág. 20)

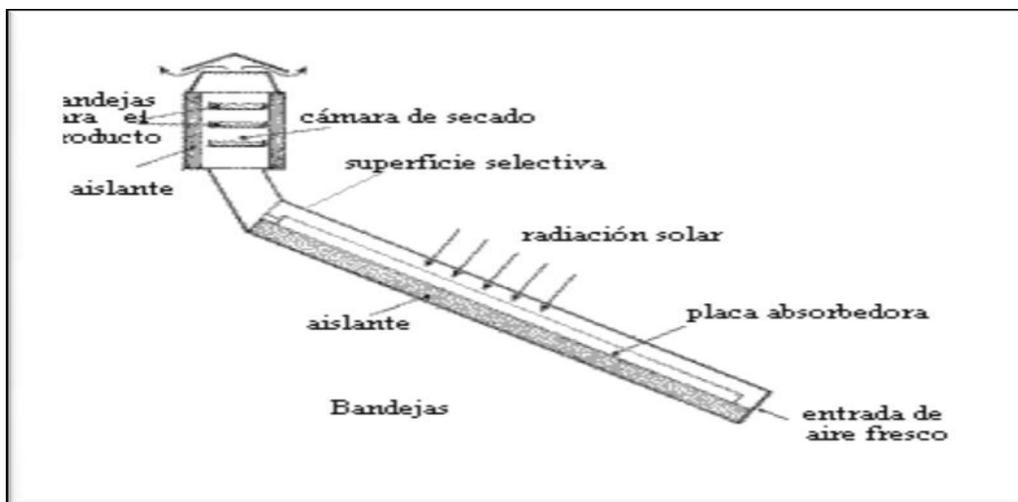


Figura n° 2.11: Secador solar indirecto.

Fuente: Larios Saldaña, 2004. Pág. 20

- Los dos elementos están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado. La cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar. Esta secadora es esencialmente de carácter convencional en la que el sol actúa de fuente energética. Los secadores directos difieren de los indirectos en la transmisión de calor y la separación de vapor. (Sánchez Proaño)

Características:

- Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son, en general, económicos desde el punto de vista del consumo de calor, ya que suministran calor sólo de acuerdo con la demanda hecha por el material que se está secando.
- El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre de naturaleza metálica.
- Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación, hasta mayores de 550°C, en el caso de secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión.
- Su funcionamiento se caracteriza por algún método de agitación para aumentar el contacto entre el material húmedo y la superficie metálica caliente, así como para efectuar un cambio continuo de material húmedo en la superficie caliente. La naturaleza de dicho contacto determina la velocidad de secado total de los secadores indirectos. Los materiales granulares

pesados dan mayor coeficiente de transferencia de calor de contacto que los materiales sólidos voluminosos. (Sánchez Proaño)

b). Secadora solar directa

Son el tipo de sencillo de secadero solar. Generalmente se utilizan para el secado de productos agrícolas, tales como frutas, forrajes y hortalizas.

En líneas generales constan de una superficie de secado cubierta por un material transparente, que protege al producto de la lluvia y de la polución. El material a secar se extiende en una capa fina sobre un fondo y es expuesto directamente a la radiación solar. (Sigüencia ávila, 2006)

Los dos elementos pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar. En los secadores solares directos la radiación solar es absorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua. Esto se debe a que la presión de vapor en la superficie del producto crece por la absorción de radiación solar. Por lo tanto el gradiente de presiones de vapor entre producto y aire se hace mayor y se acelera el secado. La combinación de colector y cámara en una sola unidad puede ser más económica en muchos casos, especialmente en los secadores de menor tamaño. Este tipo de secadores es casi siempre con circulación de aire por convección natural. Esto hace que a veces el control del proceso sea poco confiable. (Sánchez Proaño)

Características:

- “El secado se efectúa por transferencia de calor por convección entre los gases calientes y el sólido mojado, en donde el flujo de gases extrae el líquido vaporizado y separa el vapor”. (Sánchez Proaño)

c). Secadora solar mixta:

“Finalmente puede darse el caso en que la colección de radiación se realice tanto en un colector solar previo a la cámara como en la misma cámara”. (1 er voletín de vigilancia, 2008)

El Secador solar mixto presenta varias ventajas; en primer lugar el control del proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores con circulación forzada de aire). Es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido. El tener una cámara

de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara no permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder su calidad de aspecto por una exposición directa al sol. Una desventaja de este tipo de secadores es el hecho de que al añadir el colector previo a la cámara para recolectar energía solar, el tamaño del equipo y sus costos aumentan. Una segunda desventaja es que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita mover más kilogramos de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores directos. (Sánchez Proaño)

2.5.3. Principios y parámetros físicos del secador solar

Principios físicos que afectan al funcionamiento de un secador solar:

a). Efecto invernadero:

Aunque este efecto es el desarrollado por la Tierra para ser calentada, también se le llama a la confinación de aire caliente en el interior de un habitáculo por la acción de la radiación solar que atraviesa un plástico o vidrio, pero que éste es opaco a la radiación terrestre. De esta manera, parte de la radiación solar pasa a través del material transparente o semitransparente, denominada radiación de onda corta, llega al suelo, parte es absorbida y la otra reflejada. La radiación reflejada es la de onda larga o infrarroja y una parte no atraviesa el vidrio o plástico, siendo reflejada, quedándose en el interior y calentando el aire interno. (Besora Magem, 2010)

b). Transferencia de calor por convección

Transferencia de calor por las moléculas de una masa fluida, en este caso, aire. Esta transferencia de calor está asociada al movimiento de las partículas, las más lentas son desplazadas por las más rápidas, debido a la diferencia de densidad entre ambas. Debe existir diferencia de temperaturas para que se dé la transferencia de calor. (Besora Magem, 2010)

c). Transferencia de masa por convección

Es el mecanismo de transferencia de masa entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento. Este movimiento favorece la transferencia de masa, al reemplazar el fluido en contacto ya con alta concentración, por fluido nuevo con baja concentración. Como en

el caso anterior, debe existir diferencia de concentración de masa para que se produzca la transferencia. (Besora Magem, 2010)

2.5.4 Forma de Operación del secador solar

La forma de operar un secador da lugar a dos alternativas:

a). Secado en tandas

El producto es cargado en una sola tanda y la misma no se retira hasta que esté completamente seca. Todo el producto dentro del secador va pasando de un estado húmedo a un estado seco en forma paulatina. Permite un diseño más sencillo del proceso de carga y movimiento del producto dentro del equipo, por lo que resulta apropiado en secadores pequeños y medianos. (Moreno)

b). Secado continuo

El producto se va cargando y descargando en tandas parciales. Dentro del mismo secador se encuentra una parte de producto húmedo y otra casi seca. El período entre cargas de las tandas varía de acuerdo al diseño. En algunos casos la carga y descarga parcial se realiza una vez por día. En otros casos se puede llevar a cabo varias veces en el mismo día. Estos secadores pueden ser de convección natural o forzada.

2.5.5. Capacidad de Producción.

La capacidad de producción se define con relación al peso del producto fresco total que se alimenta para ser secado. En general, cada tipo de secador solar tiene un funcionamiento más apropiado en cierto rango de capacidad de producción. Enseguida se describen las características de algunos tipos de secadores más comunes según la capacidad de su producción. (Moreno)

Capacidad de producción	Modo de calentamiento	Circulación de aire	Forma de operación
Pequeña o baja.	Directo	Convección natural	En tanda
Baja o media	Directo	Acción del viento	En tanda
		Convección natural	En tanda
	Indirecto	Convección Natural	En tanda
Media a alta	Indirecto	Forzada	En tanda
	Mixto o Indirecto	Convección forzada	Continua

Figura n° 2.12: Características según capacidad de producción

Fuente: Moreno Gamaliel

2.5.6. Ventajas y desventajas de la secadora solar

Ventajas:

- Disminución del 100% de los riesgos de contaminación por basura, polvo o animales.
- Disminución de hasta el 50% del trabajo físico requerido, principalmente en beneficio de mujeres y niños.
- Disminución hasta en un 40% en el tiempo de secado.
- Menor costo de construcción en comparación con el patio de cemento (dependiendo del diseño).
- Se evita el desarrollo de hongos al dar la humedad adecuada al grano para su almacenamiento.
- se evita que el grano absorba de nuevo humedad durante la noche al cerrar las ventanas de ventilación. (1 er voletin de vigilancia, 2008)

Desventajas

Aunque son pocas las desventajas, pueden citarse las siguientes:

- Debido a la temperatura que se logra dentro del secador solar, el movimiento de la quinua debe realizarse en el menor tiempo posible para evitar cambios bruscos de temperatura para el cuerpo al salir.

- El policarbonato de la cubierta tiene una durabilidad promedio de diez años, y luego debe ser sustituido por uno nuevo.
- Si no se realiza constante movimiento de la masa de quinua dentro del área a secar, puede darse un secado disperejo. (1 er voletin de vigilancia, 2008)

2.6. SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

Un secador solar tipo domo, es un secador solar directo y es una estructura que transforma la energía que proviene del sol, en calor que juntamente con la acción y movimiento del aire, es capaz de evaporar la humedad del grano.

El secador solar tipo invernadero con cubierta parabólica que es una máquina con estructura en la misma forma, que facilita el secado de granos. El sistema básico empleado por este secador es de tipo invernadero, donde como su nombre lo indica, aprovecha este fenómeno para producir una concentración de calor debido al principio físico que involucra. (Larios Saldaña, 2004)

Un secador de este tipo se puede observar en la fig. 2.13



Figura n° 2.13: Secador solar con cubierta de plástico.

Fuente: (Larios Saldaña, 2004)

La cantidad de agua que se puede evaporar dependerá en gran medida de la temperatura que alcance el aire por medio de la transformación de energía que hace la secadora solar, y de la velocidad a que éste circule. (Moreno)

2.6.1. Prototipo de secadores solares

A continuación se muestran algunos modelos de secadores solares tipo domo.



Figura n° 2.14: Imagen prototipo de secador solar.

Fuente: (Gobernacion de Huila, 2008)

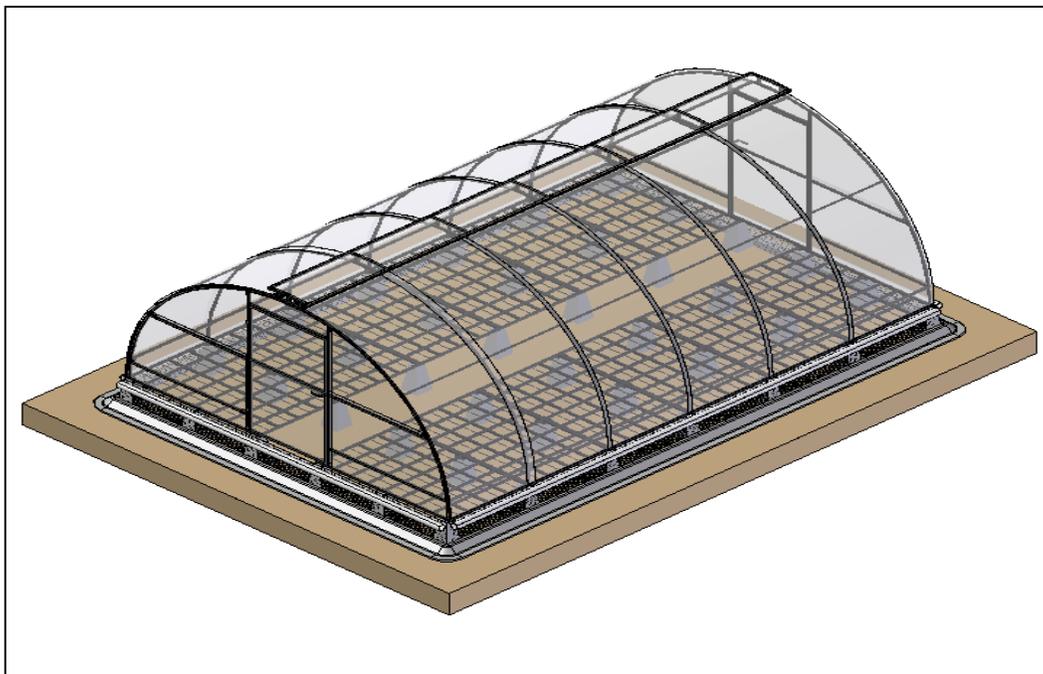


Figura n° 2.15: Secador solar con paseras divididas

Fuente: (Gobernacion de Huila, 2008)

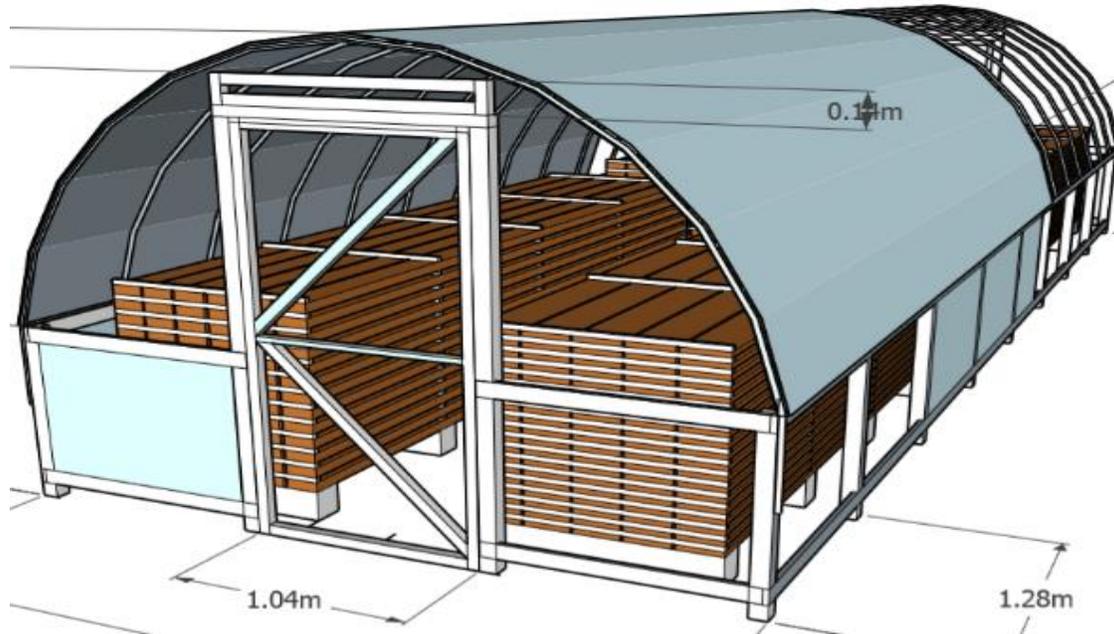


Figura n° 2.16: Prototipo del diseño frontal del secador

Fuente: (Gobernacion de Huila, 2008)

2.6.2. Tipos de circulación

Los dos elementos básicos de una secadora solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar.

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. 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 del fluido. (Incropera, 1999)

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por Convección, la ecuación es: $q = h(T_s - T_\infty)$

Donde q , el flujo de calor por convección W/m^2 , es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la “ley de enfriamiento de newton”, y la constante de proporcionalidad “ h ” W/m^2K se denomina “coeficiente de transferencia de calor por convección”. Éste 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. (Sigüencia ávila, 2006, págs. 62,63,64)

a). Circulación por convección natural

En la convección natural, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensoriales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior. Ejemplos típicos son la transmisión de calor al exterior desde la pared o el tejado de una casa en un día soleado sin viento, la convección en un tanque que contiene un líquido en reposo en el que se encuentra sumergida una bobina de calefacción, el calor transferido desde la superficie de un colector solar en un día en calma, etc. El aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. Este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar con equipos grandes. Para equipos pequeños o medianos se pueden lograr velocidades de aire de 0,4 a 1 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobrepasa los 0,1 a 0,3 m/s. (Sigüencia ávila, 2006)

b). Circulación forzada:

La convección forzada tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser un ventilador, una bomba, el viento, etc. Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

El aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica. Este tipo de circulación facilita el diseño en el caso de los equipos de tamaño grande, además de facilitar el control del proceso de secado. Usando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 0,5 y 1 m/s. La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica. (Sigüencia ávila, 2006)

Tabla n° 2.5: Valores de circulación térmica

Tipo de convección y fluido	$h_c = (w/m^2 \circ K)$
Convección natural, aire	5-25
Convección natural, agua	20-100
Convección forzada, aire	10-200
Convección forzada, agua	50-10000
Agua en ebullición	3000-100000
Vapor de agua en condensación	5000-100000

Fuente: (Siguencia ávila, 2006)

El aire circula dentro del secador con el fin de eliminar la humedad evaporada del producto. Esta circulación se logra por dos métodos: circulación forzada y por convección natural.

2.6.3. Partes de un secador solar tipo invernadero

Con los principios y parámetros de funcionamiento se pueden definir algunas de las diferentes partes de un secador solar. Las otras sirven de complemento para un mejor funcionamiento:

1. Estructura: se necesita un espacio para ser calentado, limitado por la estructura, que a la vez, soporta el material semitransparente y las bandejas donde irá la quinua a secar. Debe ser resistente y de unas dimensiones apropiadas, ya que si es demasiado grande, se pierde poder de secado.

2. Material semitransparente: para que la radiación solar entre en el habitáculo y se produzca el efecto invernadero. Se necesita que sea resistente a la intemperie y los rayos del sol.

3. Bandejas: donde irán colocados los granos de quinua a secar. Se requiere que sean lo menos pesadas posible y que tengan el fondo agujereado para el correcto paso del agua y el aire. Normalmente constituidas por un marco y una malla como fondo.

4. Puerta: es indispensable tener acceso al interior del secador y a la vez no permitir el acceso excesivo de aire en los momentos de funcionamiento. La puerta permite ambos procesos.

5. Ventanas: en ausencia de ventilación forzada, se necesita generar una corriente de aire por convección natural. Las aperturas inferiores, espacio entre el material semitransparente

y el suelo, permiten la entrada de aire frío, y las aperturas superiores, ventanas, la salida del aire caliente y cargado de humedad.

6. Suelo: debe permitir el correcto drenaje en caso de caer agua condensada o directa del producto. Debe permanecer siempre seco para no proporcionar humedad no deseada.

7. Protección: puede ser un muro o un agujero alrededor del secador que permita proteger el interior del secador del agua de lluvia y posibles intrusos. (Besora Magem, 2010)

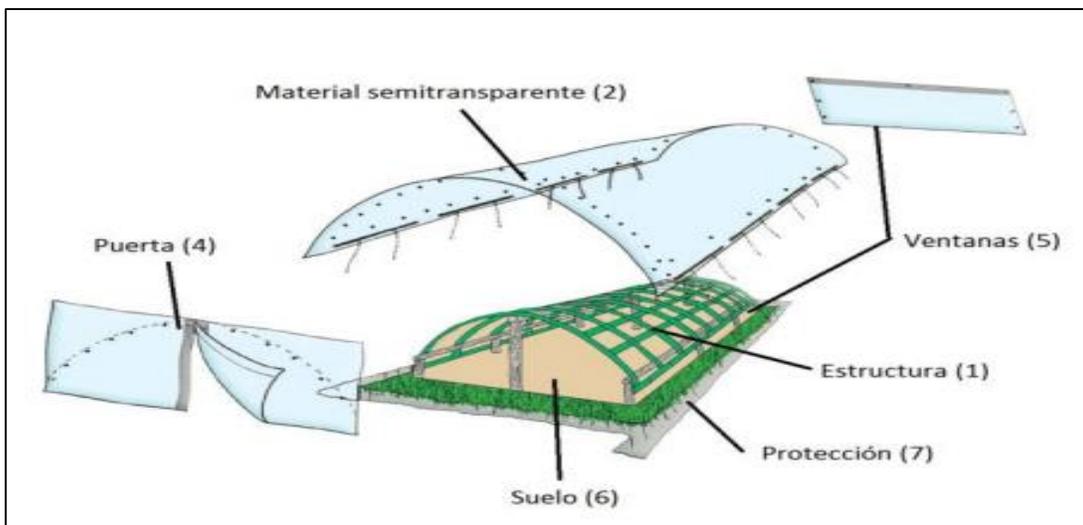


Figura n° 2.17: Cubierta de un secador solar.

Fuente: (Besora Magem, 2010)

2.6.4. Características de los sólidos

a). Contenido de Humedad

Es la cantidad de agua evaporable existente en un producto y se expresa con relación a su masa total o a su masa seca (esto es sin contar la masa de agua evaporable que contiene). Existen diferentes métodos para medir el contenido de humedad de un producto. La determinación directa del contenido de humedad implica medir la masa del producto y la masa seca correspondiente. Para medir la masa seca de un alimento generalmente se le somete a 104°C, hasta que llegue a un peso constante. En el caso de productos que se descomponen por efecto de altas temperaturas, éstos se secan poniéndolos en una estufa de vacío a 60°C y a una presión mayor de 700 Pa, hasta que lleguen a un peso constante. (Almansa & Muñoz, 1994)

b). Contenido de Humedad de Equilibrio

Una variable importante en el secado de materiales es la humedad del aire en contacto con un sólido de determinada humedad. Supóngase que a un sólido húmedo se le aplica una corriente de aire con humedad y temperatura constantes. Supóngase, también, que se usa una gran cantidad de aire, por lo que las condiciones permanecen invariables. Después de haber expuesto el sólido por tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio, llegará un momento en que éste tendrá un contenido de humedad definido. A este valor se le conoce como contenido de humedad de equilibrio del material, bajo las condiciones específicas de humedad y temperatura del aire.

Si el material contiene más humedad que su valor de equilibrio en contacto con un gas a determinada humedad y temperatura, se secará hasta alcanzar su valor de equilibrio. Si el material contiene menos humedad que su valor de equilibrio, absorberá agua hasta alcanzar dicho valor de equilibrio. (Moreno)

c). Humedad Inicial Óptima

Es de particular interés el efecto que ejerce el ambiente sobre el producto a secar durante el almacenamiento previo al secado; si el producto es almacenado en un ambiente húmedo, se recomienda acomodarlo de tal manera que se propicie un secado natural, para que favorezca un nivel óptimo de humedad inicial.

Existen diferentes métodos de secado alternativos, los que pueden disminuir el contenido de humedad de un producto, antes de introducirlo a un secador de convección. Estos métodos pueden ser de separación mecánica, e incluso por otro tipo de secador térmico, ya que comparativamente con la energía gastada por un secador convectivo, esta medida redundará en un ahorro. (Moreno)

d). Humedad Final Óptima

El secado puede considerarse como exitoso cuando el contenido de humedad del sólido que sale del secador se ha reducido lo suficiente para que pueda pasar a otros procesos o para que pueda salir a la venta inmediatamente. La importancia del contenido de humedad con el uso eficiente de la energía, no puede pasar desapercibido. Además, no tiene caso secar más allá de la humedad de equilibrio, ya que el material tendría a recuperar humedad hasta que se estabilice con la atmósfera que la rodea. Por lo anterior, se concluye

que la humedad óptima de salida es la humedad de equilibrio del material con la atmósfera donde se va a almacenar.

Es muy importante recordar que la humedad de equilibrio de un material varía de acuerdo a las condiciones atmosféricas que lo rodean, en especial de la humedad relativa y de la temperatura de bulbo seco. (Moreno)

2.6.5. Caracterización de los sólidos húmedos

Los sólidos húmedos deben ser identificados y caracterizados en sus distintas propiedades cuantitativas que permitan efectuar los balances de materia y energía en la operación de secado, con relaciones de interconexión entre los sólidos húmedos y la corriente gaseosa utilizada como gas de barrido para provocar el secado.

Componentes y Caracterización

De forma similar a las relaciones vapor gas en el estudio de humidificación en corrientes gaseosas, se hace necesario definir las relaciones másicas y energéticas establecidas entre el líquido (que humidifica al sólido) y el sólido seco que constituye la matriz de los materiales húmedos. (Arias, 2011, pág. 335)

Para propósitos del secado, en un sólido húmedo se identifican los siguientes componentes:

A Líquido ocluido (componentes volátiles, vaporizables)

S=Sp Matriz seca o sólido seco portante

a). Porcentaje de humedad:

Es la expresión porcentual del contenido de líquido (humedad) con respecto al peso total del material húmedo, es una expresión en base húmeda

$$\%_h = \left[\frac{m_A}{m_T} \right] \times 100 = \left[\frac{m_A}{m_A + m_S} \right] \times 100 \quad (2.11)$$

b). Fracción másica de humedad:

Es la expresión unitaria de la relación entre la masa de líquido contenido en el sólido húmedo, también es una expresión en base húmeda:

$$x = \frac{m_A}{m_T} = \frac{m_A}{m_A + m_S} = \frac{\%_h}{100} \quad (2.12)$$

c). Humedad absoluta:

Es la relación entre la masa de líquido contenida en el sólido y la masa de matriz sólida o sólido seco portante, denominado también como relación de humedad o humedad en base seca:

$$X = \frac{m_A}{m_S} = \frac{x}{1-x} = \frac{\%_h}{100 - \%_h} \quad \left[\frac{kg_A}{kg_S} \right] \quad (2.13)$$

La humedad absoluta en el sólido deberá entenderse como una expresión del contenido de líquido o humedad por unidad de sólidos secos, expresado en kgA/kgS; es una variable apropiada para representar el balance de materia en el secador de una forma similar a la expresión de humedad absoluta en una corriente gaseosa. (Arias, 2011, pág. 336)

d). Calor específico del sólido húmedo:

Es el calor específico del sólido húmedo pero referido a una unidad de matriz o sólido seco, de forma similar al calor específico húmedo del gas: C_S , expresada por la siguiente ecuación:

$$C_{SH} = C_{p_S} + C_{p_A}X \quad (2.14)$$

Es una combinación entre el calor específico de la matriz o sólido seco: C_{p_S} y el calor específico del líquido contenido en el sólido: C_{p_A} ; la unidad del calor específico del sólido húmedo podría ser $\frac{kcal}{kg_S C^\circ}$

e). Entalpía específica del sólido húmedo:

Es la relación de la energía específica por unidad de matriz o sólido seco, que podría expresarse en $\frac{kcal}{kg_S}$.

$$H = C_{SH}(T - T_o) = (C_{p_S} + C_{p_A}X)(T - T_o) \quad (2.15)$$

Es sumamente útil en las expresiones de balance de energía en secadores.

2.6.6. Evaluación de secadores

Se realiza la evaluación del balance de materia y energía neta que requiere el secado de materiales sólidos, para lo cual se recurre a la clasificación de acuerdo al régimen operativo de los sólidos húmedos al interior del secador, con un sistema de calentamiento directo, utilizando la energía térmica de una corriente de gas de barrido caliente; los secadores se pueden evaluar como:

- Secadores batch o intermitentes
- Secadores continuos

Secadores batch: cámaras de secado

Se realiza tanto en los sólidos sometidos a secado así como en la corriente gaseosa que circula a través de la carga de sólidos provocando el secado, debido a que la carga sólida interactúa con la corriente gaseosa recibiendo flujo de calor: q_s , que a su vez permite y provoca la evaporación del líquido desde el sólido en forma de vapor: m_v . (Arias, 2011, pág. 347)

a). Balance de Materia

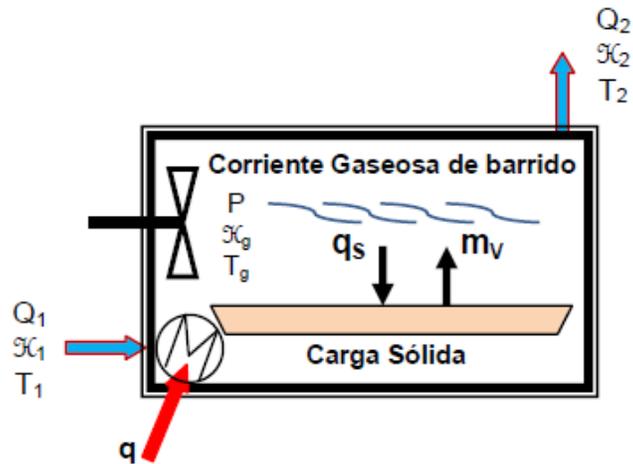


Figura n° 2.18: Perfil de balance de materia

En la carga sólida: Por ser batch se realiza entre el estado inicial de carga y el estado final de descarga de los sólidos:

$$\text{Global : } F = W + V \quad (2.16)$$

$$\text{Líquido (A): } Fx_F = Wx_W + V \quad (2.17)$$

$$Sp \cdot X_F = Sp \cdot X_W + V \quad \text{o} \quad V = Sp(X_F - X_W) \quad (2.18)$$

Donde:

F Carga del material sólido húmedo [kg]

W Descarga del material seco al final de la operación de secado [kg]

V Vapor total eliminado durante el secado del sólido [kg]

x Fracción másica de líquido como humedad en el sólido

X Humedad absoluta en el sólido [kgA/kgS]

Sp Sólido portante o matriz seca (invariable) [kgS]

En la corriente gaseosa para el secado:

Entendiéndose que el flujo de vapor que elimina el sólido es la que se incorpora a

la corriente gaseosa provocando su humidificación,

$$\text{Gas seco(B)aire} : G_p = \left[G_{p1} = \frac{Q_1}{V_1} \right] = \left[G_{p2} = \frac{Q_2}{V_2} \right] \quad (2.19)$$

$$\text{Vapor (A)} = G_p \cdot ha_1 + m_v = G_p \cdot ha_2 \quad (2.20)$$

La función de interconexión entre el sólido sometido a secado y la corriente gaseosa como agente de secado es el flujo de vapor:

$$m_v = G_p \cdot (ha_2 - ha_1) = \frac{Sp}{\theta_s} (X_F - X_W) \quad (2.21)$$

b). Balance de Energía:

Es el balance de energía térmica neta que requiere la carga sólida: **QS**, para alcanzar el secado en el tiempo neto de secado al interior de la cámara de secado batch, que se desarrolla exclusivamente para un calentamiento directo y adiabático de la carga sólida, que toma sus requerimientos de energía térmica solamente por convección térmica desde la corriente gaseosa; por lo tanto, la corriente gaseosa que ingresa al secador deberá recibir y disponer la energía térmica suficiente para mantenerse a una temperatura constante al interior de la cámara de secado, que es una característica operativa de éste tipo de equipos.

El balance de energía requiere establecer claramente las temperaturas tanto en la carga sólida y en la corriente gaseosa al interior de la cámara de secado; en la siguiente figura se presenta un esquema térmico. (Arias, 2011, pág. 349)

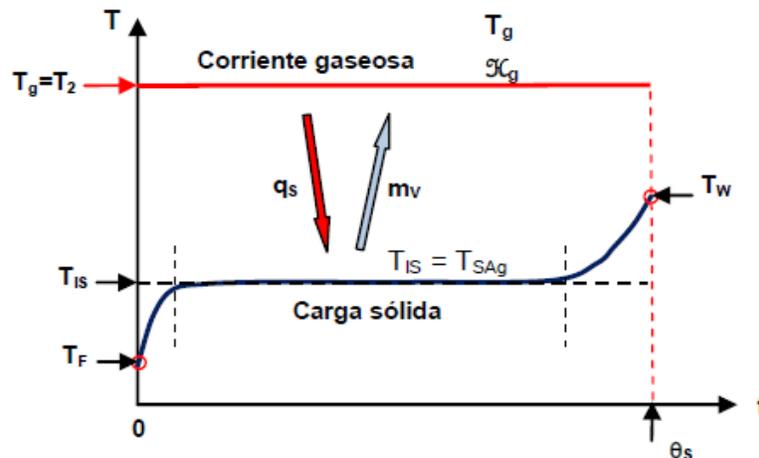


Figura n° 2.19: Perfil de balance de energía

En la carga sólida

La energía térmica neta que requiere la carga sólida para el secado al interior de la cámara es:

$$Q_S = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (2.22)$$

Donde:

Q1: Calentamiento de la matriz sólida o sólido seco desde el inicio hasta el final.

Q2: Calentamiento de todo el líquido contenido en la carga inicial, desde su temperatura inicial hasta la temperatura de evaporación en la interface.

Q3: Calor de vaporización, que permite el cambio de fase del líquido y su evaporación en la condición de interface.

Q4: Recalentamiento del líquido residual (humedad final) del sólido desde la temperatura de interface hasta la temperatura de descarga del secador.

Q5: Recalentamiento del vapor naciente en la interface sólida, desde la temperatura de interface hasta la temperatura del gas de barrido al interior de la cámara.

La determinación de cada componente térmico es:

$$Q_1 = Sp \cdot Cp_S \cdot (T_W - T_F) \quad (2.23)$$

$$Q_2 = (Sp \cdot X_F) \cdot Cp_A \cdot (T_{IS} - T_F) \quad (2.24)$$

$$Q_3 = V \cdot \lambda_{T_{IS}} \quad (2.25)$$

$$Q_4 = (Sp \cdot X_W) \cdot Cp_A \cdot (T_W - T_{IS}) \quad (2.26)$$

$$Q_5 = V \cdot Cp_V \cdot (T_g - T_{IS}) \quad (2.27)$$

Donde:

Sp Sólido seco portante o matriz sólida

V Vapor total eliminado durante el secado

X Humedad absoluta del sólido

T Temperatura

Cp_S Calor específico de la matriz sólida seca.

Cp_A Calor específico del líquido contenido en el sólido

Cp_V Calor específico del vapor.

λ Calor latente de vaporización, determinado a la temperatura de la interface sólido gas.

2.6.5. Material para el techado

a). policarbonato

El policarbonato es un grupo de termoplásticos fácil de trabajar, moldear y son utilizados ampliamente en la manufactura moderna. El nombre “policarbonato” se basa en que se trata de polímeros que presentan grupos funcionales unidos por grupos carbonato en una larga cadena molecular. (Sigüencia ávila, 2006)

El PC o Policarbonato es un material transparente que posee una elevada rigidez y una muy buena resistencia a impactos.

También posee buena resistencia a la deformación por calor, mejor que la mayoría de los plásticos.

La temperatura de uso continuo se encuentra entre $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ y aprox. $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ventajas

- Resistencia a golpes extremadamente elevada
- Transparente
- resistencia y rigidez elevadas elevada dureza
- elevada resistencia a la deformación térmica
- elevada estabilidad dimensional (elevada resistencia a la fluencia)
- buenas propiedades de aislamiento eléctrico
- elevada resistencia a la intemperie
- alta resistencia a rayos de gran energía

Desventajas

- Resistencia media a sustancias químicas
- Sensible al entallado y susceptible a fisuras de esfuerzos
- Sensible a la hidrólisis

Ejemplos de aplicación

- Sistemas de tuberías

- cubiertas acristaladas de seguridad
- plantillas de letras

Propiedades generales del policarbonato [6]

Densidad: $1,20 \text{ g/cm}^3$

Rango de temperatura de uso: $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+135 \text{ }^\circ\text{C}$

Punto de fusión: apróx. $250 \text{ }^\circ\text{C}$

Índice de refracción: $1,585 \pm 0,001$

Índice de transmisión lumínica: $90\% \pm 1\%$

Característica de incombustibilidad

Propiedades Eléctricas

Constante dieléctrica a 1 MHz 2,9

Factor de Disipación a 1 MHz 0,01

Resistencia Dieléctrica 15 – 67 kV/mm

Resistividad Superficial $10^{15} \Omega \cdot \text{m}$

Resistividad de Volumen $10^{14} - 10^{16} \Omega/\text{cm}^3$

Propiedades Físicas

Absorción de Agua – Equilibrio 0,35 %

Absorción de Agua – en 24 horas 0,1 %

Densidad $1,20 \text{ g/cm}^3$

Índice de refracción 1,584 – 1,586

Índice de Oxígeno Límite 5 – 27 %

Inflamabilidad V0-V2

Número Abbe 34,0

Resistencia a los Ultra-violetas Aceptable

Propiedades Térmicas

Calor Específico: aprox. 1200 J/(K·kg)

Coefficiente de Expansión Térmica: $65 \times 10^{-6} - 70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Conductividad Térmica a 23 °C: 0,19-0,22 W/(m·K)

Temperatura Máxima de Utilización: 115 – 130 °C

Temperatura Mínima de Utilización: -135 °C

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN Y LUGAR DE LA EXPERIMENTACIÓN

La zona de construcción se localiza en Urb. San José Mz. I LT 04 Distrito de Andrés Avelino Cáceres, Provincia de Huamanga, Departamento de Ayacucho.

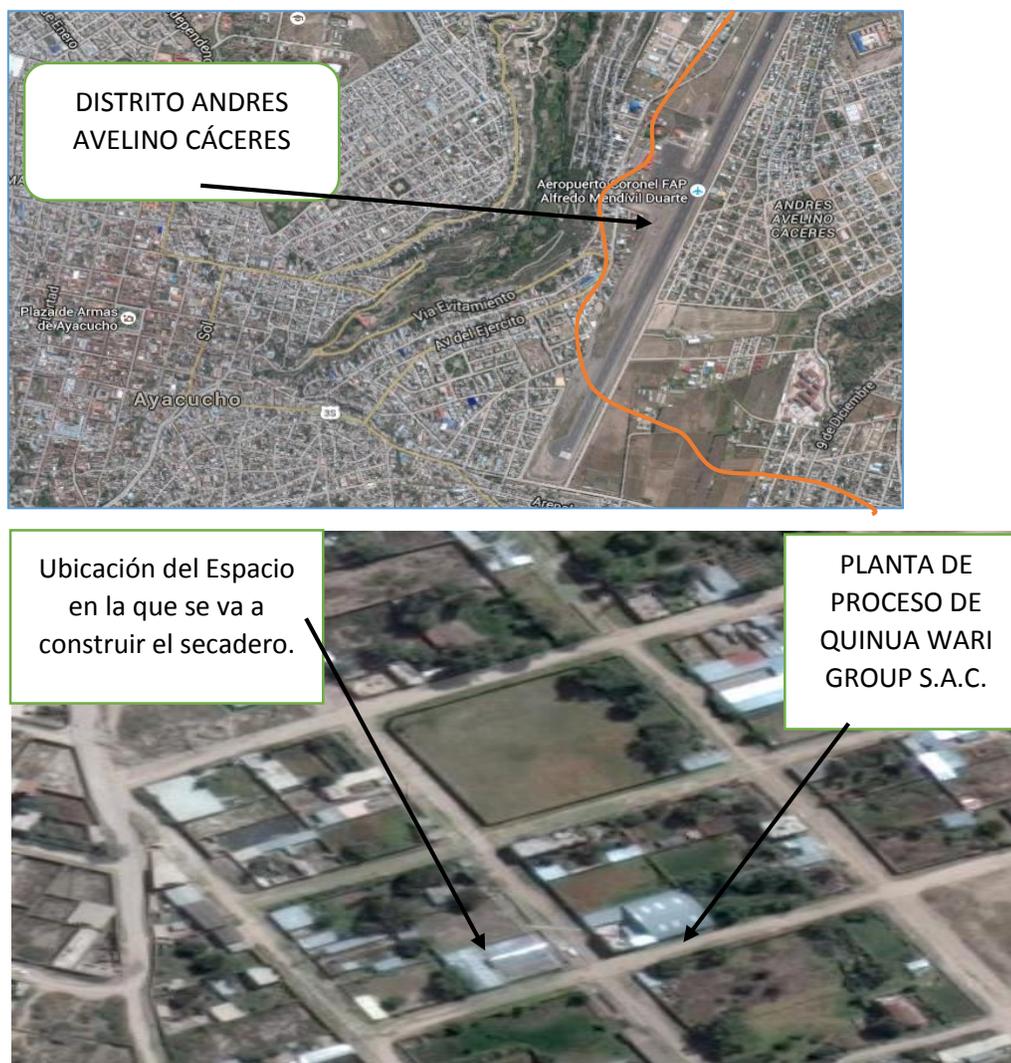


Figura n° 3.1: Ubicación del lugar de la construcción del secador solar

El proceso de recolección de datos y evaluación de parámetros (fototérmicos, secado y producto) se ha realizado en la misma planta de procesamiento usando como muestra la misma quinua que se procesa.

3.2. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN

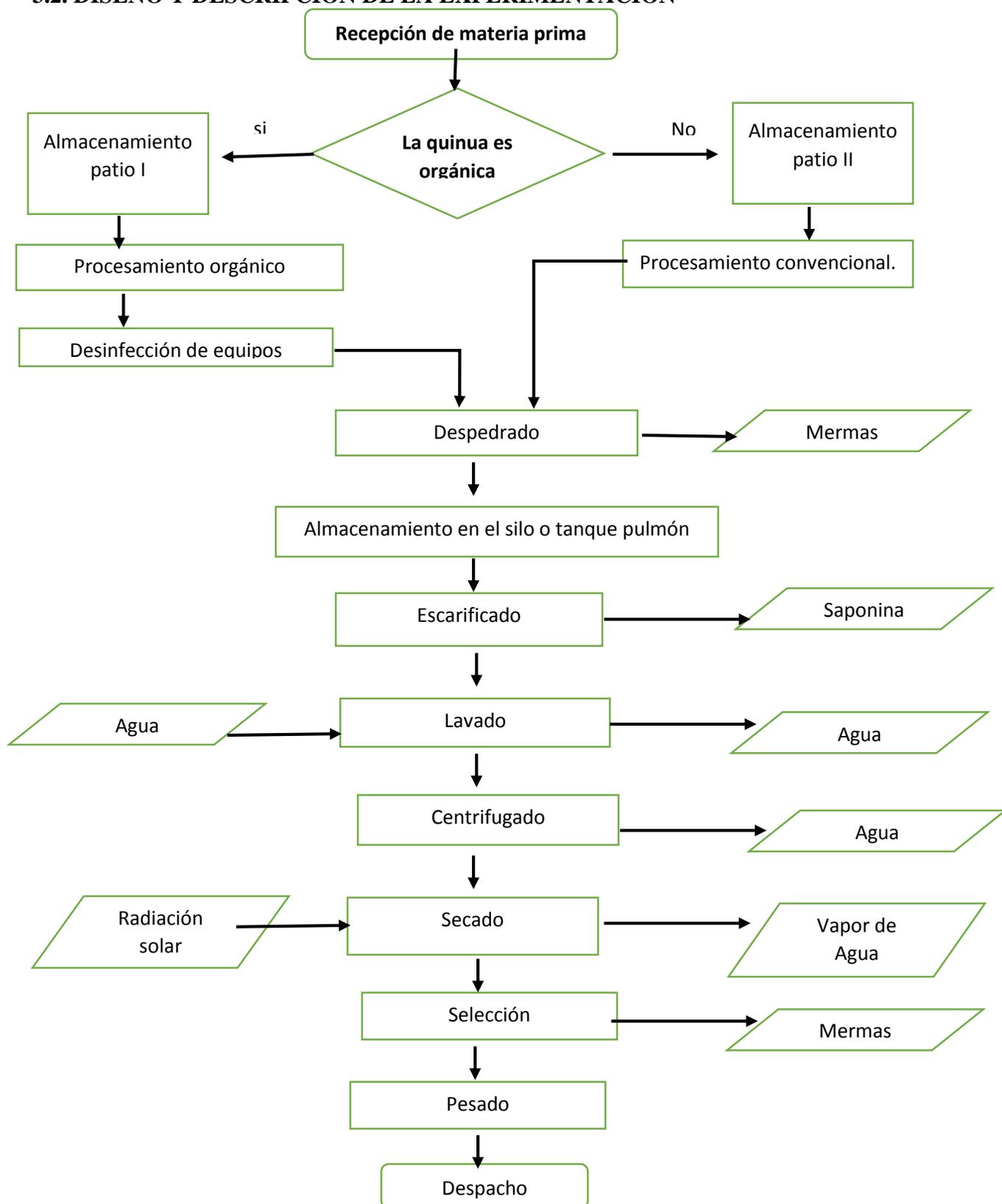


Figura n° 3.2: Diagrama de flujo de procesamiento de quinua en Wari Group S.A.C.

- Una vez que salga del centrifugado se mide la humedad de los granos para ver con qué porcentaje de humedad ingresa al secador solar. Cuando ya se coloque la masa de quinua a secar se mide temperatura del aire interior y porcentaje de humedad cada cierto tiempo para armar el perfil de temperatura y velocidad de secado.
- La evaluación de datos se basa en comparar los obtenidos en el secado tradicional y en el secador solar para así comparar las curvas de secado con la finalidad cuán eficiente es el secador solar.

3.3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.3.1. Materia prima

Granos de Quinoa (*Chenopodium quinoa*)

3.3.2. Equipos e instrumentos

a). Para la construcción del secador solar

Para la construcción del secador solar se va a requerir de los siguientes materiales que a continuación se detalla.

- Policarbonato transparente
- Accesorios del policarbonato (unión y h)
- Varillas de tubos galvanizados de diferentes medidas.
- Planchas de acero inoxidable
- Máquina para soldar
- Cortadora de metal
- Discos de corte para metal
- Silicona silkaflex
- Cemento
- Agregados (hormigón, arena fina).
- Alambre
- Herramientas básicas (pala, pico, etc.).
- Lija
- Acro
- Nivel de mano

- Flexómetro
- Bisagras
- Pintura blanca

b). Para la evaluación de los parámetros.

Para la evaluación de parámetros como temperatura, % humedad se va a emplear los siguientes instrumentos:

- Cronómetro : para medir el tiempo de secado
- Termo Higrómetro: para medir temperatura, humedad y humedad relativa de aire en el interior del secador solar.
- Medidor de humedad: Esto se usó para determinar la humedad en los granos a intervalos de tiempo.
- Termómetro: Esto se usó para medir la temperatura ambiente.
- Balanza: Esto se usó para determinar el peso de las muestras.

3.4. CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS

- La norma técnica peruana especifica de manera concreta la normas sobre calidad de granos con ciertos límites máximos permisibles (LMP), en base a ello con el secado tradicional o en patios la contaminación se acerca demasiado al LMP por ello mediante la construcción del secador solar se busca disminuir casi en su totalidad la contaminación microbiológica, ver (Anexo 2 y 3).
- El área a construir para secador solar que se está disponiendo es en los 324 m^2 pertenecientes a Wari Group S.A.C.

3.4.1. Evaluación inicial de calidad de la muestra

- En el secado tradicional se observa muy notoriamente la apariencia de calidad de los granos: presencia de hojuelas de plantas aledañas al campo de secado, heces de aves, insectos, etc. Visto estos problemas aún más se requiere mejorar la calidad de producción en el secado, por ello se va disponer la construcción de un secador solar.

3.5. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL

3.5.1. Elaboración del perfil de temperatura y porcentaje de humedad.

- Una vez concluida la construcción de secador solar se empezará a poner en marcha el secado de la quinua, para ello el proceso experimental que vamos a desarrollar es la medición de temperatura del interior del secador y porcentaje de humedad de los granos de quinua para elaborar el perfil de temperatura y porcentaje de humedad y con esos datos se graficará la velocidad de secado.

3.5.2. Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación se desarrollarán de acuerdo a los estándares establecidos en la norma técnica peruana 205.062-2014.

Tabla n° 3.1: Requisitos bromatológicos de los granos de quinua

Requisitos	Unidad	Valores		Método de ensayo
		Mín.	Máx.	
Humedad	%		13,5	AOAC 945.15
Proteínas	%	10		AOAC 992.23
Cenizas	%		3,5	AOAC 945.38
Grasa	%	4,0		AOAC 945.38 - 920.39 C
Fibra cruda	%	3,0		AOAC 945.38 - 962.09 E
Carbohidratos	%	65		Determinación Indirecta por la diferencia de 100 en %
Saponinas	mg/100 g	Ausencia		Método de la espuma

Fuente: (Norma Técnica Peruana, 2014)

Del cuadro de requisitos notemos que la humedad de la quinua debe estar en el rango de 11 a 13,5 %, durante el secado los granos de quinua se deben recoger a 11 a 12 % de modo que cuando se envíe a lima llegue con 13 %.

CAPÍTULO IV

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ACTUAL

La empresa Wari Group S.A.C tenía un sistema de secado tradicional (en patios sobre mantadas de polietileno), que durante el día solo lavaba una vez la quinua, esto debido a que el secado demora de 6 a 8 horas, es decir casi todo el día; además estaba expuesto a la contaminación con hojuelas de árboles aledaños, material particulada (polvo) y a las lluvias repentinas.

A continuación se describe el proceso que se llevaba a cabo antes de la construcción del secador solar; el procesamiento de quinua en la empresa Wari Group S.A.C. consta de las siguientes etapas que a continuación se detalla:

4.1.1. Despedrado

Es una limpieza que consiste en quitar impurezas (piedrecillas, hojas, tallos). Se emplea malla n° 10 ASTM para separar piedras y hojuelas, y malla n° 20 ASTM para separar partículas menudas. A la vez tiene extractor para separar polvo. La velocidad de obtener un producto libre de polvo, pajillas y piedras se detalla a continuación:

Tabla n° 4.1: Flujo másico del despedrado.

Quinua que pasa las mallas.		
Quinua	kg/min	Toneladas/ hora
negra	17.4	1.044
amarilla	4.8	0.288
roja	14.2	0.852
blanca	14.6	0.876

- La quinua negra pasa muy rápido por la depredadora debido a que es muy menuda.

DESPEDRADORA



Figura n° 4.1: Vista de la despiedradora.

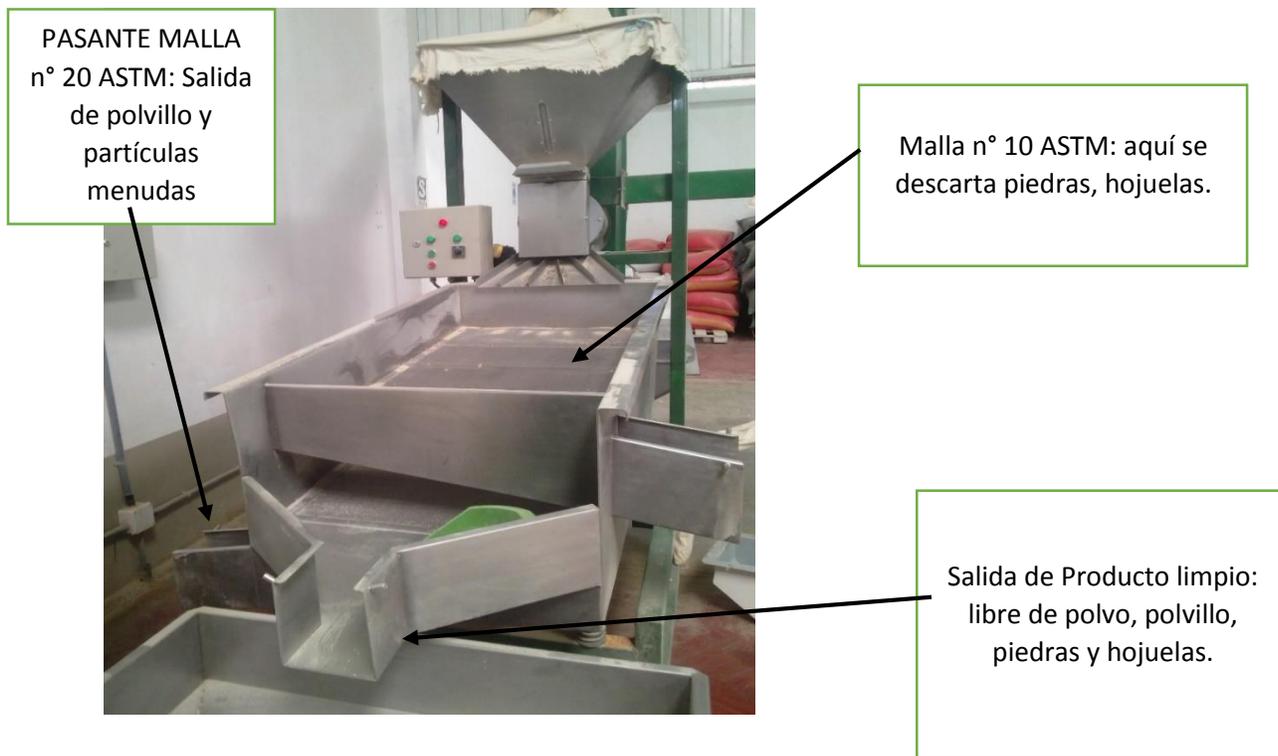


Figura n° 4.2: Divisiones de la despiedradora.

4.1.2. Silo pulmón

- Capacidad de almacenamiento 3500 kg
- En acero Inoxidable, AISI 304.

- Visor tapa hermética.
- Tolva de descarga
- Medidas Altura:2.50m Largo:1.50 m Ancho : 1.70m.



Figura n° 4.3: Vista de tanque pulmón.

4.1.3. Escarificado

En esta etapa se escarifica la quinua orgánica, el cual consiste en retirar la saponina por fricción; operación que consisten en la remoción del pericarpio al someter a los granos a un proceso de fricción con piedras abrasivas de grado alimenticio.

A continuación se detalla el flujo másico de escarificado de acuerdo al tipo de quinua.

Tabla n° 4.2: Flujo másico de escarificado.

escarificado		
tipo	kg/min	Kg/s
negra	7.8	0.13
amarilla	3.7	0.0617
roja	6.8	0.1133
blanca	12	0.2

- La quinua blanca se escarifica rápido debido a que la cáscara es más suave; pero la roja, negra y amarilla son muy duras y se da más tiempo de escarificado.

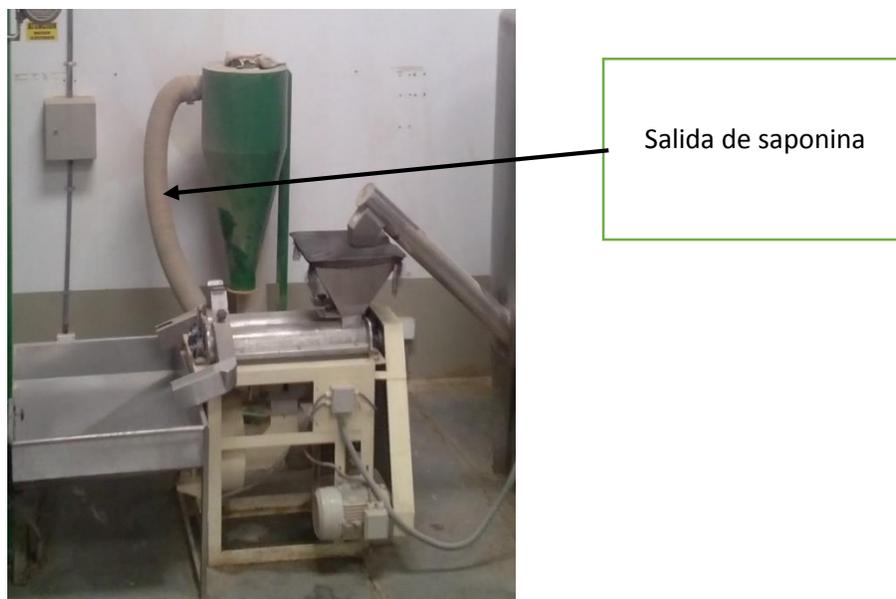


Figura n° 4.4: Vista de la escarificadora.

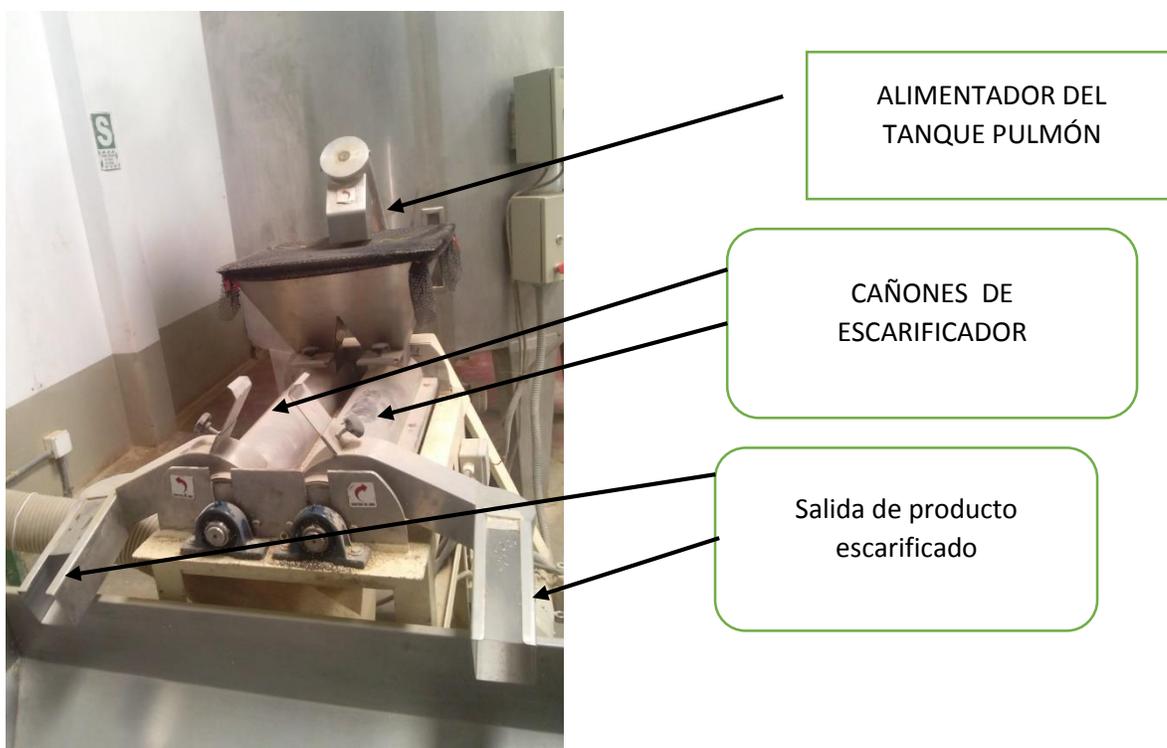


Figura n° 4.5: Partes del escarificador

4.1.4. Lavado: (250 kg / batch)

Operación en la cual se utiliza agua de consumo humano para eliminar las impurezas que quedan en el proceso de escarificado y/o restos de arenilla y tierra adheridos a la materia prima.

El tipo de agua que se usa es el agua potable de la red pública (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Ayacucho S.A).

Se tiene un tanque lavador de agitación continua en sistema batch.

- De material Acero Inoxidable AISI304.
- altura=2.90m, Largo=1 m, Ancho=0.95.
- Con válvula de salida, Tapa Hermética.
- Motor 7.5 Hp
- Sistema de Paleta.
- No salpica, y no rompe granos.
- Nivel de Agua.
- Visor hacia el producto

Tiempo de lavado:

El lavado varía de acuerdo al tipo de quinua y de acuerdo a la calidad del escarificado:

Tabla n° 4.3: Tiempo de lavado de la quinua

Variedad de quinua	Tiempo de lavado
Quinua blanca	5 min
Quinua roja	9-11 min
Quinua negra	8-10 min
Quinua amarilla	5-6 min

La quinua después del lavado pasa por la centrifuga, con el objetivo de separar todo el agua posible, dejándolo con una humedad 33 a 35 %.

4.1.5. Centrifugado

Operación que consiste en eliminar los restos de agua, por efecto del girado de un tambor cribado a altas rpm que contiene los granos que fueron sometidos al lavado.

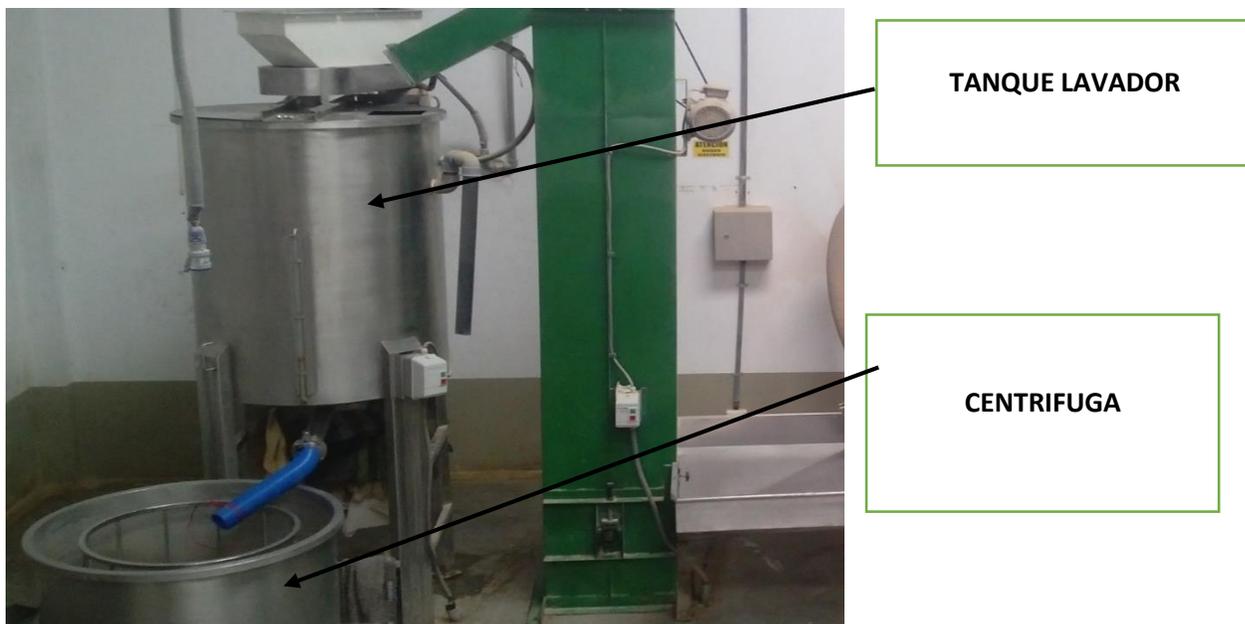


Figura n° 4.6: Vista del tanque lavador y centrifugado.

4.1.6. Secado

El secado es con un sistema tradicional (en patio sobre mantadas de polietileno), en esta etapa se reduce la humedad contenida en la quinua; el cual consiste en tender y remover constantemente el producto y exponerlo por horas a la radiación solar. La duración del secado es de 5 a 8 horas de acuerdo a la cantidad de quinua lavada, y también de acuerdo al clima.



Figura n° 4.7: Secado tradicional

4.1.7. Seleccionador por tamaño

- Fabricada en Acero Inoxidable AISI304
- Estructura en Acero al Carbono
- Máquina de práctico manejo que nos permite obtener 03 calidades de grano.
- Largo=3mt,haltura=1.50cm,Aancho=95cm
- Presenta un sistema de Limpiador, para evitar que se obstruya los granos.

Tabla n° 4.4: Características de la seleccionadora.

TIPO DE QUINUA	N° MALLA ASTM
PRIMERA	Quedante malla 14
SEGUNDA	Pasante malla 14
TERCERA ,MENUDA Y PARTIDOS	Pasante malla 16



Cañón del
seleccionador

Figura n° 4.8: Vista de la seleccionadora de granos



Ingreso de producto a seleccionar.

Pasante malla n° 16
ASTM: salida de menuda, tercera, granos partidos.

Pasante malla n° 14 ASTM:
salida de quinua segunda.

Quedante malla N° 14 ATSM:
Salida de producto primera

Figura n° 4.9: Partes de la seleccionadora de granos.

4.1.8. Pesado

En dicha área se envasa, pesa y sella una cantidad determinada de quinua orgánica (50 kg / saco). Asimismo se genera un lote de salida para el control de su distribución final y trazabilidad.



Figura n° 4.10: Área de pesado.

4.1.9. Almacén

Una vez terminada con el procesamiento se almacena y se etiqueta el lote.



Figura n° 4.11: Vista del almacén de granos orgánicos.

4.2. DISEÑO DEL SECADOR SOLAR

4.2.1. Selección del tipo de secador.

La selección del secador se hizo entre los tipos directa, indirecta y mixta, se seleccionó el secado solar directo llamado como secador solar tipo invernadero o domo porque es una de los secadores más comunes y fácil de construir debido al menor costo de construcción en comparación con otras; también se eligió debido a su fácil operación; además por el uso que le da a la energía limpia que es la radiación solar.

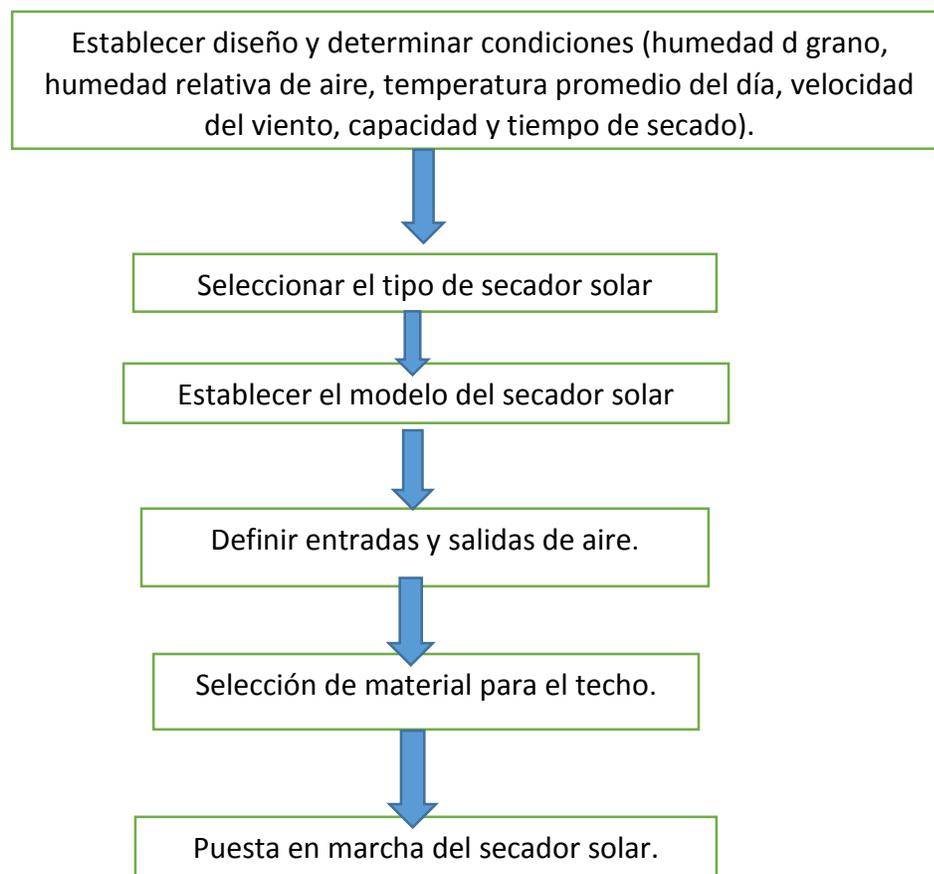
La necesidad de evitar la contaminación de la quinua durante el secado tradicional (mantadas), hizo que la planta WARI GROUP S.A.C. se encontrase en la necesidad construir un secador solar para evitar la contaminación y mejorar el tiempo de secado para de ese modo incrementar la capacidad de producción de la planta de procesamiento.

Luego de evaluar varias posibilidades de solución sobre el problema de contaminación se tomó en cuenta también el problema del cuello de botella de la empresa. El cuello de botella que la empresa presentaba era el secado de la quinua, debido a que usaba el secado natural (secado en patios sobre mantadas). Entonces es ahí donde se propuso la construcción de un secador solar tipo domo o efecto invernadero con la finalidad de mejorar la calidad del grano y optimizar el tiempo de secado.

4.2.2. Procedimiento de diseño

- Establecer condiciones de diseño y supuestos, es decir, características de los granos a secar, datos climáticos, capacidad de la secadora que se quiere, contenido de humedad inicial y final, tiempo de secado.
- Seleccionar el tipo de secador solar a construir.
- Establecer el modelo de la estructura del secador solar.
- Definir las entradas y salidas del aire, a la vez diseñar ventanas de ventilación.
- Selección de material para el techado.
- Puesta en marcha
 - ✓ Evaluar el espesor de la quinua que se carga.
 - ✓ Evaluar el tiempo de remoción de la quinua.

4.2.3. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño



4.2.4. Determinación de los parámetros de funcionamiento

Dentro de los parámetros de funcionamiento se consideran la cantidad de quinua a secar y el tiempo que dura el secado, contenido de humedad de los granos de quinua (inicial y final).

a) Cantidad de quinua a secar

Se propone secar $F_0=1500$ kg de quinua lavada por día solar, parámetro que fijará la capacidad la del área de secado en nuestro caso el terreno destinado a las construcción del secador solar es $18m \times 18m = 324m^2$, permitirá estimar el volumen de aire caliente que se va a generar, además servirá para determinar el área de la superficie ocupada por los granos húmedos y su disposición interna dentro del secador solar.

b) Tiempo de secado

Parámetro importante que se deduce del secado tradicional; se estima que el tiempo de secado va ser menor al tiempo de secado tradicional. Se estima que el tiempo de secado va ser de 4 a 6 horas.

c) Contenido de humedad de la quinua

Para la determinación del contenido de humedad inicial y final de los granos de quinua se usa un higrómetro digital. Este higrómetro se manda a la ciudad de Lima cada 3 meses para que lo calibren.

% humedad inicial	% humedad final
30 – 35	11.5

4.2.5. Determinación de los parámetros térmicos y termodinámicos

Se consideran los siguientes parámetros:

a). Temperatura del aire de secado:

El conocimiento de este parámetro es importante porque influye en la calidad del producto final, la bibliografía recomienda $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ como temperatura máxima de secado para los granos de quinua, también se anota que un incremento de 10°C en la temperatura del aire es suficiente para el proceso de secado, que influye directamente en el tiempo total.

b). Temperatura y humedad relativa a la salida el secador.

El temperatura del aire de entrada es a la temperatura del ambiente; la humedad de aire que entra al secador es 32 % a una temperatura promedio 22°C; la temperatura y el porcentaje de humedad del aire a la salida será a la misma temperatura del interior del secador, conociendo estos datos se empleará el diagrama psicrométrico a condiciones de Huamanga que está a la presión de 548mmHg para determinar las propiedades del aire.

4.2.6. Consideraciones generales del diseño

Es esta sección es necesario definir algunas características y condiciones de funcionamiento del secador solar

- a). El proceso de secado escogido es el de secado directo de tipo invernadero por convección natural.
- b). El secador funcionará las durante el día.
- c). El tiempo estimado de secado es menor a la del secado tradicional, como se sabe que en el secado tradicional $F_o=1500$ kg seca en 7 a 8 horas, se estima que en el secador solar el tiempo de secado durará 4 a 6 horas.
- d). La cámara de secado tendrá una cubierta transparente (policarbonato) en forma de invernadero.
- e). En la parte alta frontal y detrás habrá ventanas de ventilación.
- f). Los materiales que se usaran para la construcción de secador solar serán tubos galvanizados, planchas de policarbonato, planchas de acero inoxidable, etc.

4.2.7. Consideraciones psicrométricas

El calentamiento de aire y el secado de los granos está representado sobre el diagrama psicrométrico, con la que se calculará la cantidad de flujo de aire que se requiere para secar $F_o=1500$ kg.

Los datos que se usarán son las condiciones del aire a la entrada del secador y estas son:

Temperatura promedio de entrada: 22°C

Humedad relativa promedio del aire: 32 %

Los datos de salida estimadas son:

Temperatura promedio de salida: 36°C

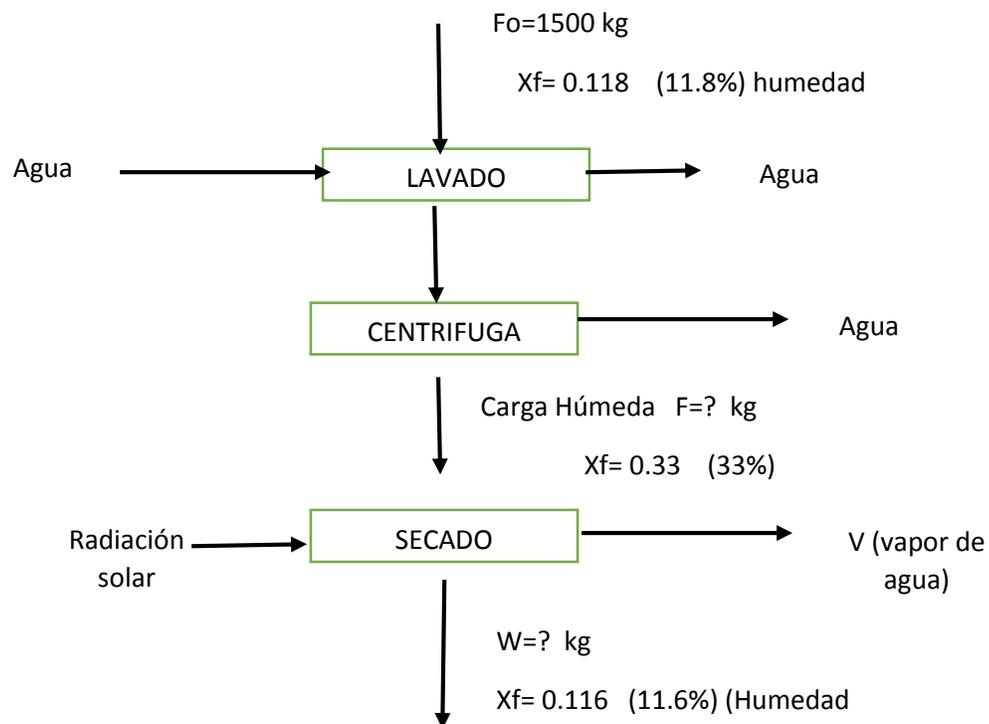
Humedad relativa promedio del aire: 35 %

El resumen de estas consideraciones psicrometricas se detalla a continuación:

Tabla n° 4.5: Resumen de las condiciones del aire

Entrada del secador solar	Salida del secador solar
Temperatura: 22°C	Temperatura:36°C
Humedad relativa:32%	Humedad relativa:35%
Contenido de humedad: 0,0061 kg vapor/kg aire seco	Contenido de humedad:0,0184 kg vapor/kg aire seco

Durante el proceso de secado el contenido de humedad de los granos de quinua varía desde 33% inicial, hasta 11% final.



La cantidad de agua por extraer de los granos de quinua es: **478.02 kg**.

Para una $F_o = 1500$ kg

$$F = W + V$$

$$F \cdot x_F = W \cdot x_W + V$$

$$Sp \cdot X_F = Sp \cdot X_W + V$$

$$V = Sp(X_F - X_W)$$

Datos:

$$F_o = 1500 \quad x_{F_o} = 0.118$$

$$x_F = 0.33 \quad x_W = 0.116$$

$$Sp = F_o(1 - X_{F_o}) = F(1 - X_F) = W(1 - x_W)$$

De la siguiente ecuación se tiene:

$$F = 1974.63 \text{ kg}$$

$$Sp = 1323 \text{ kg}$$

$$W = 1496.61 \text{ kg}$$

$$V = 478.02 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta que la variación del contenido de humedad del aire es igual al vapor de agua extraído del producto; con los valores de la tabla n° 4.5, la cantidad de aire necesaria para evaporar 478.02 kg de agua es:

$$G_p = \frac{m_A}{H_{a2} - H_{a1}} = \frac{478.02 \text{ kg}_{\text{vapor}}}{0.0184 \frac{\text{kg}_{\text{vapor}}}{\text{kg}_{\text{aireseco}}} - 0.0061 \frac{\text{kg}_{\text{vapor}}}{\text{kg}_{\text{aireseco}}}} = 38863.41 \text{ kg}_{\text{aireseco}}$$

$$\text{Flujo de } G_p = \frac{G_p}{t_{\text{secado}}} = \frac{38863.41 \text{ kg}_{\text{aireseco}}}{6 \text{ h}} = 6477.23 \frac{\text{kg}_{\text{aireseco}}}{\text{h}}$$

Luego para extraer los **478.02 kg** de agua se requieren $6477.23 \frac{\text{kg}_{\text{aireseco}}}{\text{h}}$

4.2.8. Cálculos de diseño

El diseño y los cálculos para determinar las dimensiones del secador solar estará dividido en 4 etapas: especificaciones, soluciones requeridas, datos y cálculos.

a) especificaciones

- capacidad del secador solar : $F_o=1500$ kg de quinua
- humedad inicial y final de los granos de quinua son 30-35 % y 11 % respectivamente.
- Periodo de secado o tiempo de secado total: 6 horas.
- Temperatura del aire a la salida del secador solar : $36\text{ }^\circ\text{C}$

b). Soluciones requeridas:

- Espesor o altura de los granos de quinua.
- Área de la cámara de secado: el área destinado para construcción del secador solar es 324 m^2 y el área que se usará para el secado de granos es: 310 m^2
- Tamaño de la entrada del aire.

c). Datos

- Los 1500 kg de quinua lavada ocuparan un volumen de 1.22 m^3 , tomando como densidad aparente de la quinua: $1230\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- La radiación solar promedio, en el mes de octubre, es $650\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, medido durante 5 horas del día (desde las 9am hasta las 2pm) (VITOR, 2013, pág. 54)
- El flujo de aire a través de los granos de quinua, de las consideraciones psicrométricas es necesario $6477.23\frac{\text{kg aire seco}}{\text{h}}$ para secar $F_o=1500$ kg de quinua en 6 horas.

$$\dot{m}\text{ aire} = 6477.23\frac{\text{kg aire seco}}{\text{h}}$$

- La temperatura ambiente promedio en el día lo meses de agosto, setiembre y octubre es 22°C .

d) Cálculos

El espesor de la quinua dentro del secador:

$$e = \frac{V}{A} = \frac{1.22\text{ m}^3}{310\text{ m}^2} = 0.4\text{ cm}$$

4.2.9. Energía calorífica necesaria para calentar el aire

La energía calorífica útil necesaria para calentar el aire diariamente, proveniente de la energía solar es:

$$q = Q_{aire}(H_2 - H_1) \quad (4.1)$$

$$H = (0.24 + 0.46H_{abs.})T + 598H_{abs}$$

$$H_2 = (0.24 + 0.46 \times 0.0184) \times 36^\circ C + 598 \times 0.0184 = 19.95 \frac{Kcal}{Kg_{aire}}$$

$$H_1 = (0.24 + 0.46 \times 0.0061) \times 22^\circ C + 598 \times 0.0061 = 8.98 \frac{Kcal}{Kg_{aire}}$$

$$q = 6477.23 \frac{kg_{aireseco}}{h} \left(19.95 \frac{Kcal}{Kg_{aire}} - 8.98 \frac{Kcal}{Kg_{aire}} \right)$$

$$q_{util} = 71055.21 \frac{kcal}{h}$$

4.2.10. Cálculo de la radiación global

Para la estimación de la radiación solar incidente sobre una superficie en lugar y fecha determinados se emplea el promedio de la intensidad de radiación en Ayacucho de $650 \frac{W}{m^2}$ (VITOR, 2013, pág. 54).

$$\text{referencia de Intensidad de radiacion solar } (I) = 650 \frac{W}{m^2}$$

$$\text{El área del domo o cupula la que recibe la radiacion es} = 356.4m^2$$

$$q_{solar} = I \cdot A_{domo}$$

$$q_{solar} = 650 \frac{W}{m^2} \times 356.4m^2 = 231660 W$$

$$q_{solar} = 199325.05 \frac{kcal}{h}$$

4.3. CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

Se construyó de acuerdo a las condiciones atmosféricas de Huamanga y al terreno destinado a la construcción. Las Características del área destinada para la construcción del secador solar:

- Piso de cemento; es ahí donde antes ya se realizaba el secado en patio lo que significa que no hay circulación intrapartícula del aire.
- Medidas de espacio: 18 x 18 m. teniendo así un área de 324 m² para la construcción del secador solar.

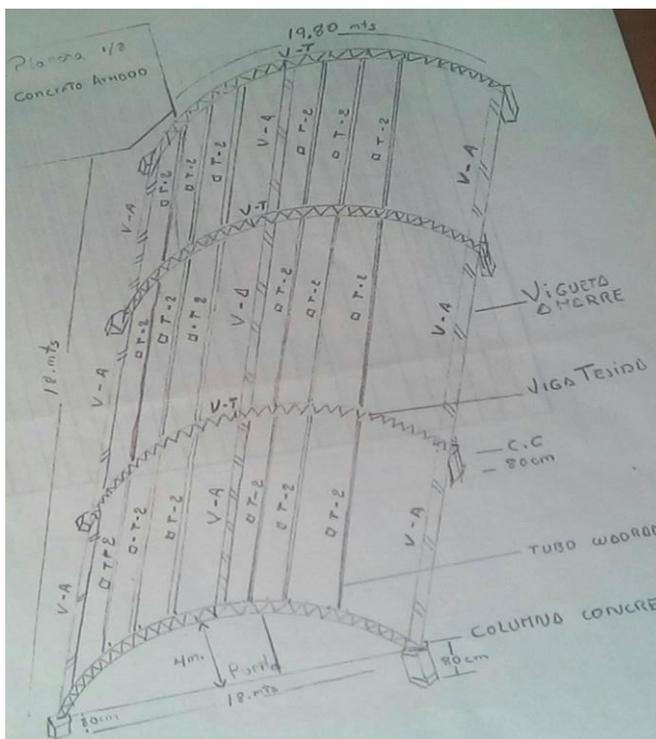


Figura n° 4.12: Bosquejo inicial del secador solar

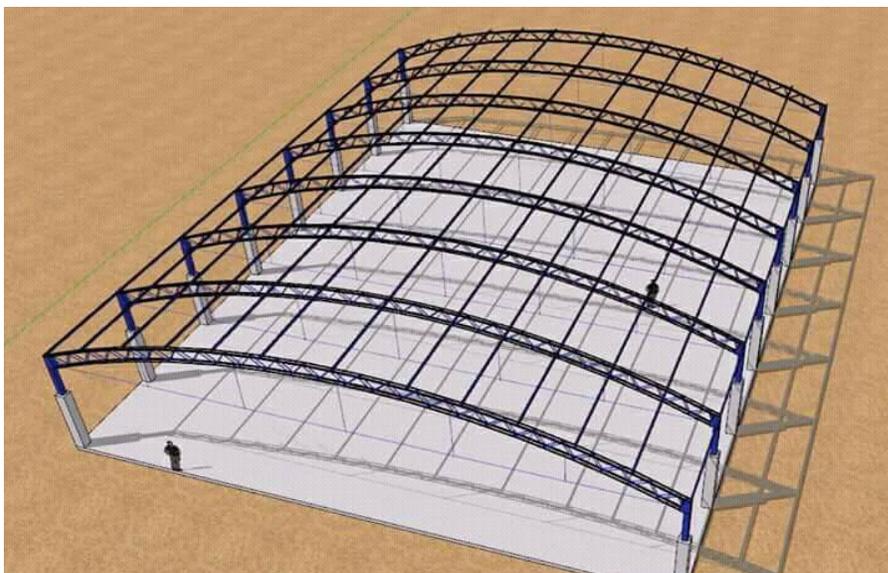


Figura n° 4.13: Modelo de cubierta

Se eligió el policarbonato como material de techado debido a su durabilidad, ya que el tiempo de vida es 10 años, en cambio el plástico UV solo dura 3 años.

4.3.1. Selección de terreno

En la construcción del secado solar es de suma importancia la buena elección del terreno donde se ubicará, sin olvidar las consideraciones siguientes:

- a). El lugar donde se ubicará debe ser terreno elevado o ligeramente elevado, el que no será inundado, además poseerá un buen drenaje:
- b). El área ocupada deberá recepcionar tanta radiación solar como sea posible.

4.3.2. Construcción del secador solar

Es necesario hacer un resumen de las características principales que intervienen en la construcción del secador solar tipo invernadero diseñado para secar $F_o=1500$ kg de quinua lavada y diferentes cantidades de otros productos agrícolas y/o agroindustriales.

- Área destinada a la construcción del secador solar: $18m \times 18m = 324 m^2$
- El piso del secador solar es piso de concreto pulido con pendiente ligera hacia la salida, para el fácil escurrimiento de las aguas durante el lavado.
- Profundidad de las columnas de concreto 1.50 m
- Altura de las columnas de soporte: 80 cm (8 columnas en total).
- El domo del secador solar nace a partir de 80 cm de altura.
- Área del techo del secador solar = $19.80m \times 18 m = 356.4 m^2$
- Una puerta de dos hojas para el fácil acceso del personal y de la quinua lavada.
- En la parte superior hay ventanas de ventilación una en la parte delantera y otra en la parte de atrás (1.80 m x 1.20m)
- En la parte baja de los laterales hay 3 ventanas en cada lado (6 en total), ventanas de apoyo de ventilación, esto para facilitar la circulación de aire caliente. La medida por ventana es (1m x 0.90 m), con $5,4m^2$ de área de ventilación.
- El techo se techará con policarbonato transparente, asimismo las partes frontales.
- En la parte baja del lateral se pondrá planchas de acero inoxidable para que refleje la radiación solar hacia la quinua para de eso modo incrementar la temperatura de la cámara de secado.

1. Espacio destinado para la construcción del secador solar.



Figura n° 4.14: Espacio para la construcción

2. Construcción de zapatas y columnas para que reciba la carga de las vigas de metal (en éste área nos apoyó un ing. Civil especializado en análisis estructural). Las zapatas tienen una profundidad de 1.30m y 1m de ancho. Las columnas tienen altura de 80 cm.



Figura n° 4.15: Columnas de soporte

3. Armado de las 4 vigas en forma de U, de 4 m de altura de tubo galvanizado.



Figura n° 4.16: Armazón de vigas de metal en forma de U.

4. Luego se acomodó las vigas de metal.



Figura n° 4.17: Colocación de las vigas de metal.

5. Obteniendo así el estructura del secador solar



Figura n° 4.18: Armazón del secador solar.

6. Se eligió policarbonato para el techado debido a su durabilidad (10 años) y a que en otros países se trabajan con éste material.



Figura n° 4.19: Recepción del policarbonato.

7. Inicio del techado con policarbonato



Figura n° 4.20: Inicio del techado con policarbonato



Figura n° 4.21: Vista de un avance del techado

8. Vista del secador techado con policarbonato



Figura n° 4.22: Secador solar concluido con el techado.

9. En la parte inferior en todo el rededor se puso planchas de acero inoxidable para que refleje la radiación solar hacia el interior del secador y de esa manera incremente el calor.



Figura n° 4.23: Colocación de la planchas de acero inoxidable.

10. Se colocó ventanas en la cumbre del domo para la circulación del aire, además se construyó 3 ventanas en cada lateral para el apoyo de ventilación



Figura n° 4.24: Vista de la ventana principal de ventilación.



Figura n° 4.25: Ventanas auxiliares

(Se recomienda tapar con malla fina para evitar el ingreso de insectos).

11. Secador solar construido.



Figura n° 4.26: Vista de la construcción concluida



Figura n° 4.27: Vista del interior del secador solar.

4.3.3. Cálculo de costo del secador solar

Tabla n° 4.6: Balance de costos de la construcción del secador solar

Materiales necesarios	Costos S/.	Duración de construcción
zapatitas y columnas pequeñas (materiales y mano de obra)	7148	15 días
20 tubos galvanizados	1420	
26 tubos galvanizados cuadrados 2x1.8mm	1794	
23 tubos galvanizados (1x1.5mm)	609.5	
arqueado de tubos galvanizados	800	3 días
6 galones de zinc cromado	213	
6 tinner	104	
disco corte	140	
soldaduras	180	
17 planchas galvanizadas	1042	
22 varillas Ángulo	200	
39 planchas de policarbonato	10920	
36 varillas "H" de policarbonato	1440	
plancha galvanizada negra + soldadura	186	
silicona neutra	125	
mano de obra construcción	9500	50 días
costo total	35821.5	68 días.

4.4. PUESTA EN MARCHA DEL SECADOR SOLAR

Para poner en marcha el funcionamiento y determinar los parámetros primeramente se limpió toda el área del secador. A continuación se detallará el comportamiento de parámetros como temperatura, humedad para cierta cantidad de quinua a secar.

4.4.1. Forma de operación

- Los granos de quinua lavada y centrifugada fueron transportados al secador solar. En esta operación se realiza un control estricto del tiempo y temperatura determinando la humedad de los granos de quinua.

- El secado de quinua se realiza en tandas o lotes, es decir, El producto es cargado en una sola tanda y la misma no se retira hasta que esté completamente seca (con humedad 11 a 12 %).
- El personal se encarga de remover / airear los granos tendidos sobre mantadas de polietileno cada 20 a 30 min. para homogenizar el secado, se remueve con una especie de paleta en forma de rastrillo, para ello usan implementos especiales (sandalias, uniformes, gorros).
- La capacidad de producción se define con relación al peso del producto fresco total que se alimenta para ser secado. Por ello se va a trabajar con diferentes masa desde Fo=750 kg hasta Fo=1500 kg, de éste modo se determinará la capacidad óptima del secador solar en el tiempo geográfico dado (soleado, parcialmente soleado, nublado).
- El tiempo de secado depende de la cantidad de granos a secar y del clima.
- El contenido de humedad de los granos que ingresan al secador es de 30-35 % de humedad.
- Los granos salen del secador a (11 – 12) % de humedad.

4.4.2. Evaluación de rendimiento térmico para el secador fabricado.

Después del diseño y la fabricación del secador, se realizaron varios experimentos de secado, es decir se puso a usar en el secador fabricado, a fin de establecer el rendimiento térmico del secador y finalmente determina su viabilidad económica. Esto se logró mediante la ejecución de secar los granos de quinua en las siguientes condiciones:

- Variar masa del lote a ingresar al secador solar Fo=(1500, 1250, 1000, 750 kg de materia prima con 11% para el lavado y su posterior secado que sale de 30 a 35% de humedad.).
- Variar la hora del inicio del secado, se empezó a secar a distintas horas del día, de eso modo determinar la cantidad a secar a una determinada hora.

$$n = \frac{q_{util}}{q_{solar}} = \frac{\dot{m}_{aire} * (H_2 - H_1)}{I * A_c} \quad (4.2)$$

Donde:

H : Entalpia especifica

I : Intensidad de la radiación solar promedio: $650 \frac{W}{m^2}$

A_c : Área del colector solar (en nuestro caso es todo el techo de policarbonato) m^2

Reemplazando datos:

$$n = \frac{q_{util}}{q_{solar}} = \frac{71055.21 \frac{kcal}{h}}{199325.05 \frac{kcal}{h}}$$

$$n = 35.6 \%$$

4.4.3. Evaluación de tasa de disminución de tiempo de secado

El rendimiento del secador se evaluó utilizando la velocidad de secado y la eficiencia del sistema. Además, la tasa de secado que es la cantidad de la humedad eliminada de los granos en un tiempo dado fue computada.

$$n = \frac{\text{tiempo de secado en patio} - \text{tiempo de secado secador solar}}{\text{tiempo de secado en patio}} \quad (4.8)$$

$$n = \frac{(8h - 5h)}{8h} = 37,5 \%$$

4.4.4. Controles en la determinación del tiempo de secado de la quinua

A. Velocidad del viento

Como el secador se evaluó en los meses de agosto, setiembre y octubre. Se tomó referencia a datos experimentales de un trabajo de investigación sobre la determinación de tiempo de secado en Ayacucho a escala pequeña que hizo el año 2014, que se detallara en la bibliografía., en la figura (2.7 y 2.8).

B. Radiación solar

Como se evaluó el secador solar los meses de agosto, setiembre y octubre. También se tomaron datos de referencia medidas en esos meses de años anteriores. La intensidad de radiación solar promedio de esos meses es $650 \frac{W}{m^2}$. Ver figura (2.9 y 2.10)

C. Temperatura en el secador

En cuanto a la temperatura se hizo un perfil de temperatura en los días casi soleados y soleados. También se midió la temperatura de ambiente.

4.5. EVALUACIÓN DEL SECADOR SOLAR

4.5.1. Procedimientos durante el secado

A continuación se muestra un diagrama de flujo de los procedimientos a realizar durante de secado.

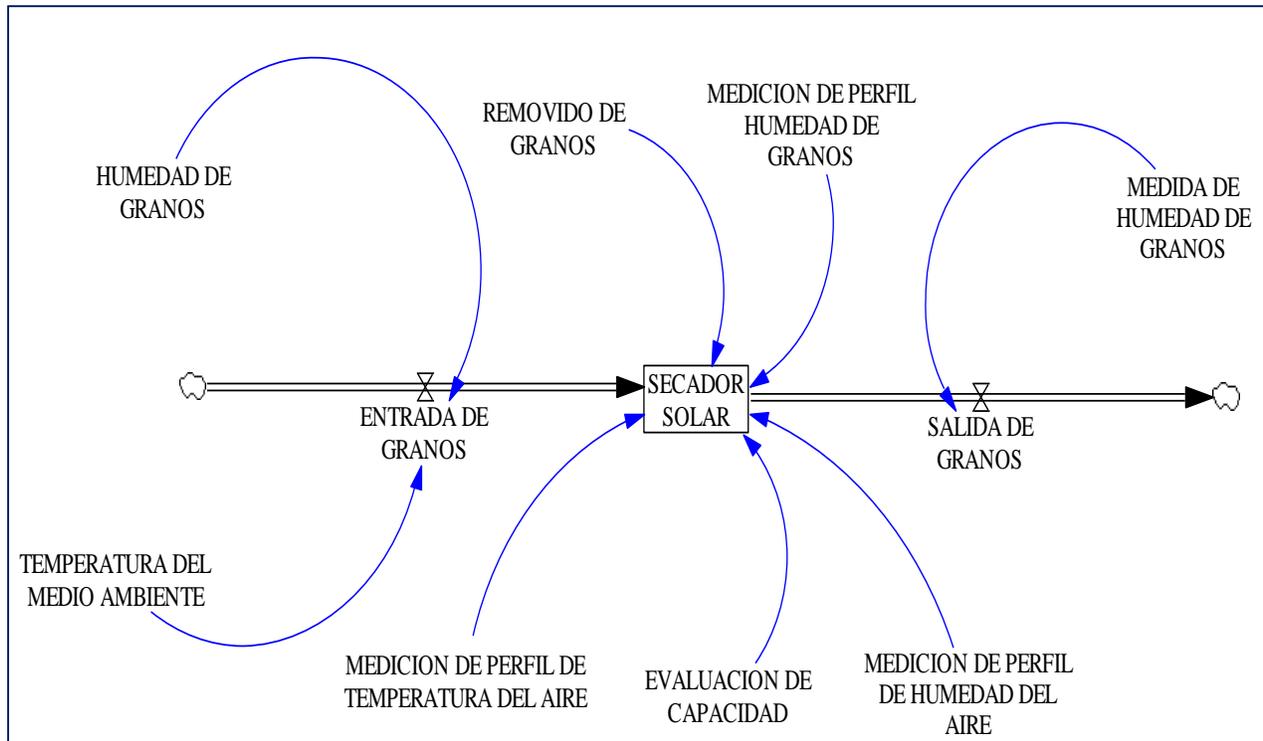


Figura n° 4.28: Procedimientos durante el secado

4.5.2. Características físicas del grano de quinua

La quinua entra al secador solar con 30 a 33 % de humedad.

4.5.3. Perfil de temperatura

Se detalla a continuación la variación de temperatura al interior del secador solar con una carga húmeda de 1992.5 kg con humedad 33%, en día soleado, poco soleado y también se presenta la variación de la temperatura fuera del secador solar.

Los datos de la variación de temperatura tanto en el interior y alrededores del secador solar se presenta en el anexo 1, a continuación se muestra el perfil de temperatura. El tiempo 0 es a las 8 am.

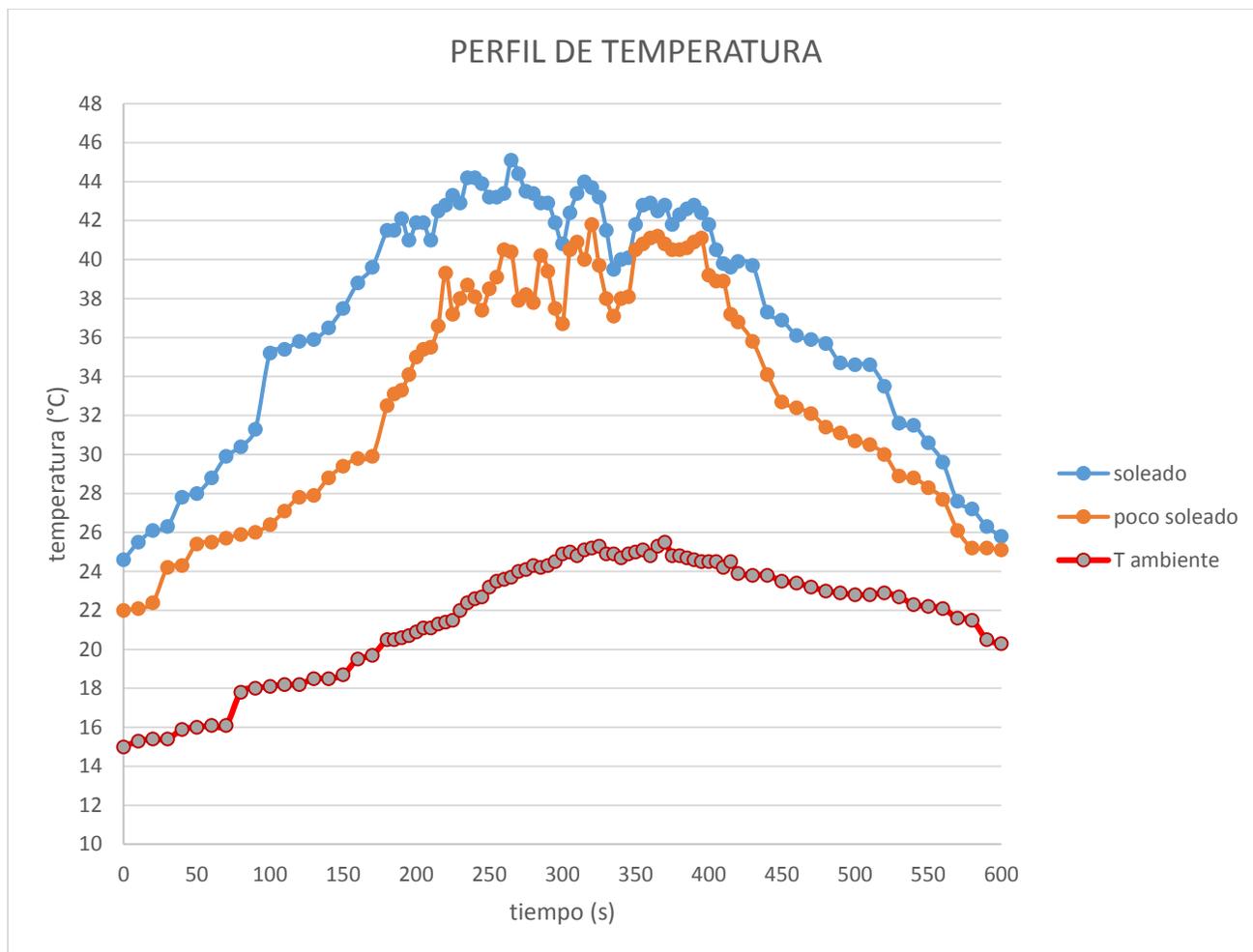
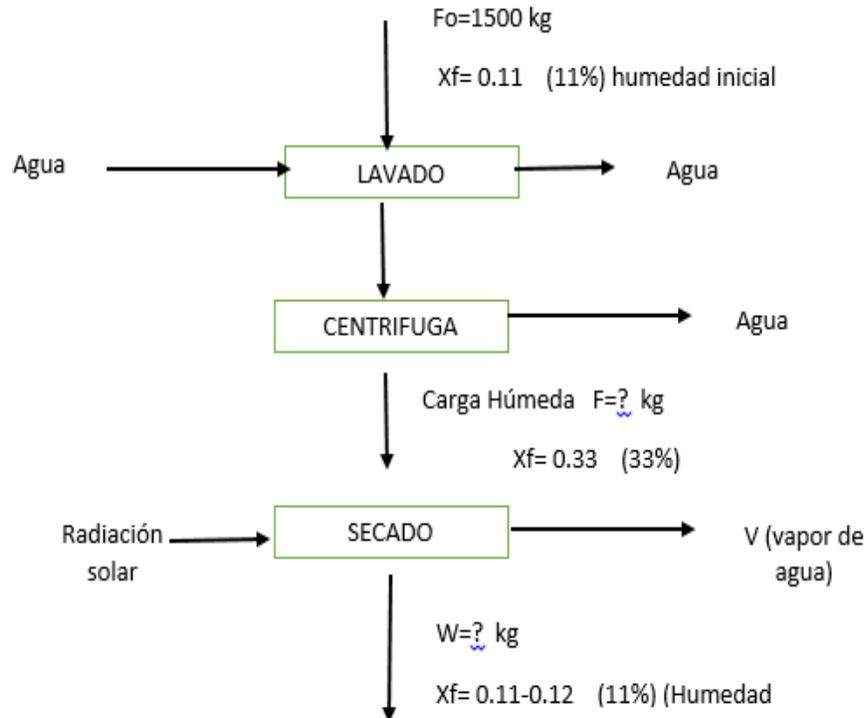


Figura n° 4.29: Perfil de temperatura

4.5.4. Curvas y velocidad de secado

Para evaluar la capacidad del secador solar se va a emplear diferentes cargas de material sólido, es decir la masa de materia prima que va a ingresar al lavado va variar desde $F_0 =$ (750, 1000, 1250 y 1500 kg) con una humedad de 11%. Y en cada lote se va a evaluar el tiempo de secado en un determinado tiempo del día (puede ser en la mañana, medio día o en la tarde). A la vez se va a comparar con el secado tradicional (en mantadas en el patio) mediante diagramas de perfiles de humedad, temperatura y curvas de velocidad de secado.



$$S_p = F_o(1 - X_{F_o}) = F(1 - X_F) = W(1 - x_W)$$

$$S_p = \text{matriz seca}$$

A continuación se va hacer caracterización de solido húmedo: es decir se va a evaluar todas las características como: porcentaje de humedad, fracción másica de humedad, humedad absoluta, curvas y velocidad de secado. Las ecuaciones que se usaran son los siguientes:

Porcentaje de humedad:

$$\%_h = \left[\frac{m_A}{m_T} \right] \times 100 = \left[\frac{m_A}{m_A + m_S} \right] \times 100$$

Fracción másica de humedad:

$$x = \frac{m_A}{m_T} = \frac{m_A}{m_A + m_S} = \frac{\%_h}{100}$$

Humedad absoluta:

$$X = \frac{m_A}{m_S} = \frac{x}{1 - x} = \frac{\%_h}{100 - \%_h} \quad \left[\frac{kg_A}{kg_S} \right]$$

Velocidad de secado

$$R = -\frac{S_p}{A} \frac{dX}{dt}$$

Donde:

S_p : Matriz sólida o sólido seco portante [kgS]

A: Área o superficie de exposición al secado [m²]

X: Humedad absoluta del sólido [kgA/kgS]

t : Tiempo [s]

dX/dt: Gradiente de humedad absoluta

a). Para una carga $F_o = 1500$ kg. (Día nublado).

En el secador solar desde las 8 am – 3.50pm

Tiempo de secado: 7h 30min.

Tabla n° 4.7: Datos de curvas y velocidad de secado para una carga húmeda (F) de 1974 kg.

Fo (kg)	1500		F (kg)	1974.63	Sp (kg)	1323.00	Área (m ²)	310
xfo	11.8%		xf	33%	xw	11.60%		

i	t(min)	%H(base húmeda)	x	X $\left[\frac{kg_A}{kg_s} \right]$	R $\left[\frac{kg_A}{m^2 \cdot min} \right]$
1	0	31	0.31	0.4493	
2	30	28.5	0.285	0.3986	0.0072
3	60	26.2	0.262	0.355	0.0062
4	80	25.1	0.251	0.3351	0.0042
5	90	24.1	0.241	0.3175	0.0075
6	140	21.6	0.216	0.2755	0.0036
7	180	21.2	0.212	0.269	0.0007
8	210	19.6	0.196	0.2438	0.0036
9	240	19.5	0.195	0.2422	0.0002
10	290	17.3	0.173	0.2092	0.0028
11	350	15	0.15	0.1765	0.0023
12	410	13.3	0.133	0.1534	0.0016
13	440	12.6	0.126	0.1442	0.0013
14	470	11.7	0.117	0.1325	0.0017

Variación de humedad absoluta

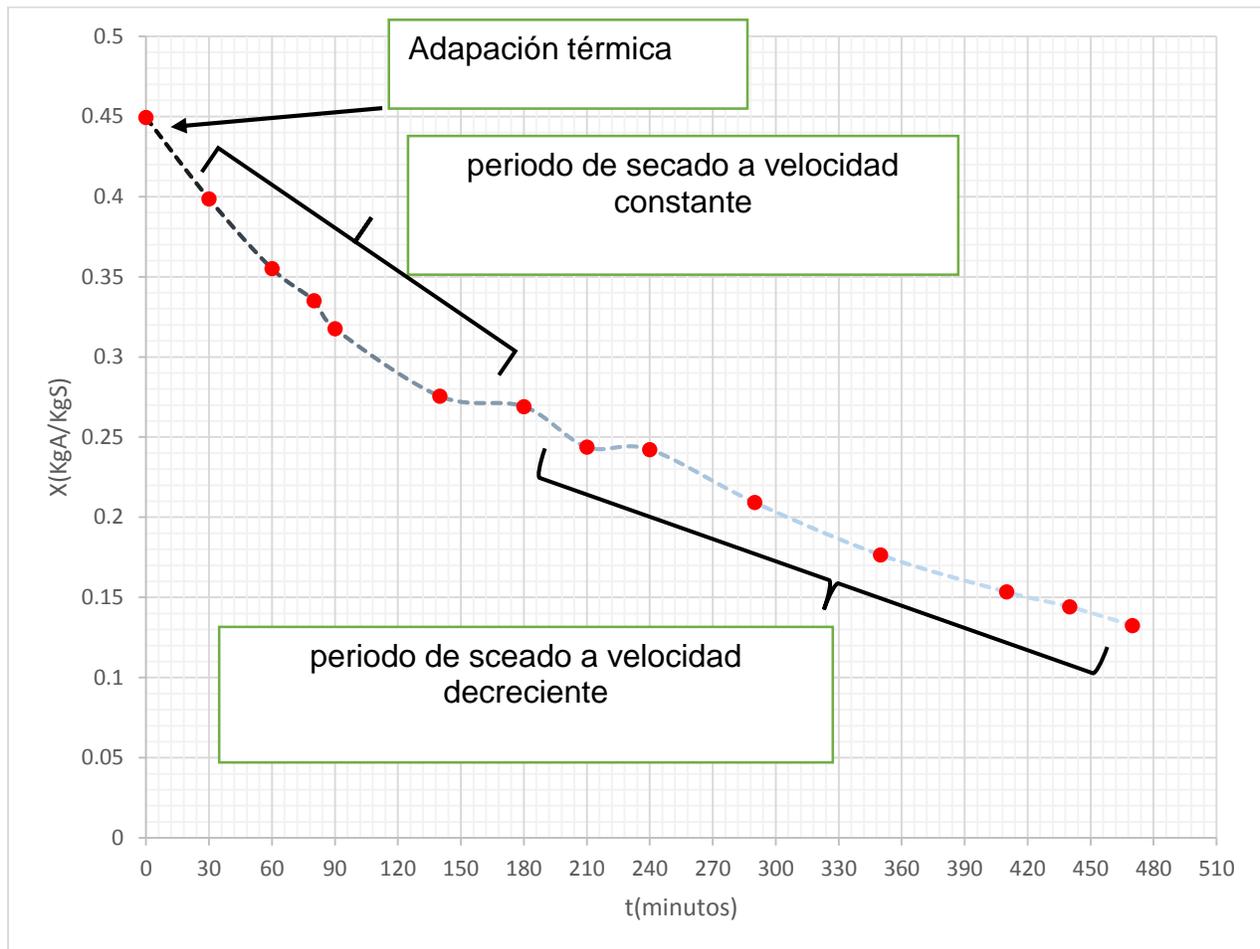


Figura n° 4.30: Periodos en la variación de la humedad absoluta para $F=1974\text{kg}$

Velocidad de secado

- En la gráfica X vs R el conjunto de puntos del gráfico se dividen en 2 grupos, los que definen la zona antecrítica o de velocidad constante, ajustados a una línea horizontal, y el resto de los puntos se definen zona postcrítica o de velocidad decreciente, que se ajustan apropiadamente a una línea recta.

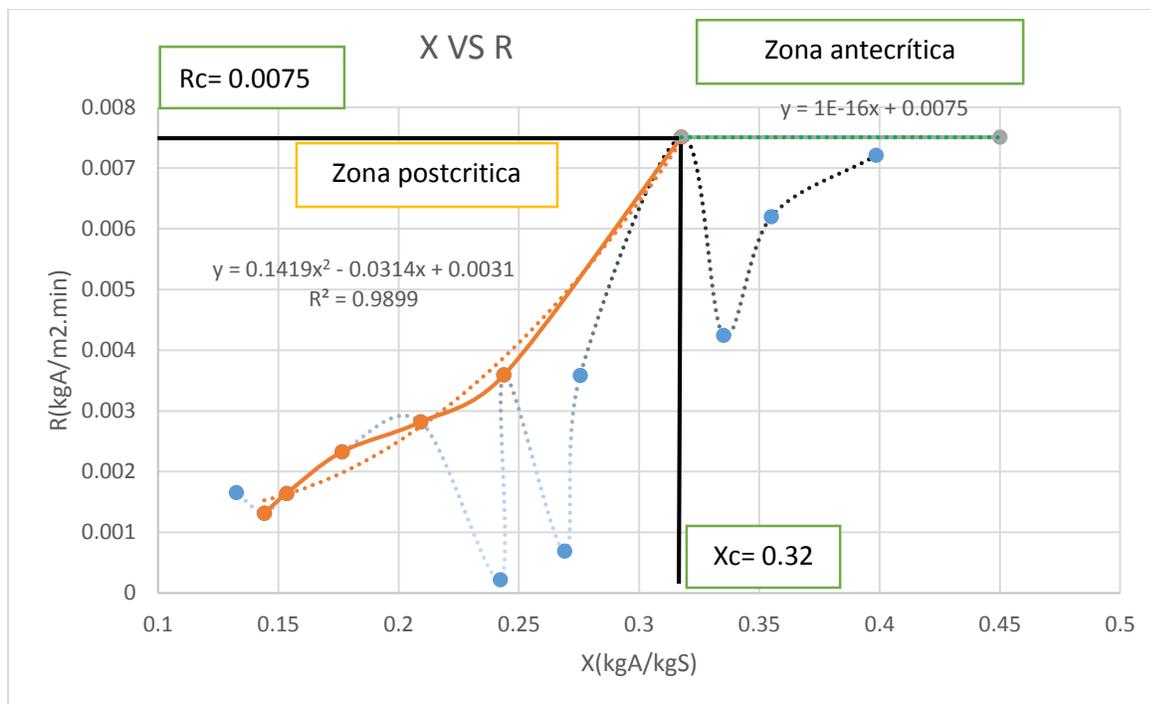


Figura n° 4.31: Periodos de secado en X vs R para F=1974kg.

- En el grafico X vs R se puede diferenciar los periodos de secado.

b). Para una carga Fo= 1000 kg : Día soleado

Tabla n° 4.8: Datos de curvas y velocidad de secado para una carga húmeda (F) de 1263kg.

hora inicio: 11am final: 2pm

Tiempo de secado en el secador solar: 3 horas.

Fo (kg)	1000	F (kg)	1262.86	Sp (kg)	884.00	Area (m ²)	310
Xfo	11.6	Xf	30	xw	11.60%		

i	t(min)	%H(base húmeda)	x	X $\left[\frac{kgA}{kgS}\right]$	R $\left[\frac{kgA}{m^2 min}\right]$
1	0	30	0.3	0.4286	
2	20	24.1	0.241	0.3175	0.0158
3	40	23.4	0.234	0.3055	0.0017
4	60	21.5	0.215	0.2739	0.0045
5	80	17.5	0.175	0.2121	0.0088
6	140	16	0.16	0.1905	0.0010
7	160	14.1	0.141	0.1641	0.0038
8	180	11.7	0.117	0.1325	0.0045

Variación de la Humedad absoluta

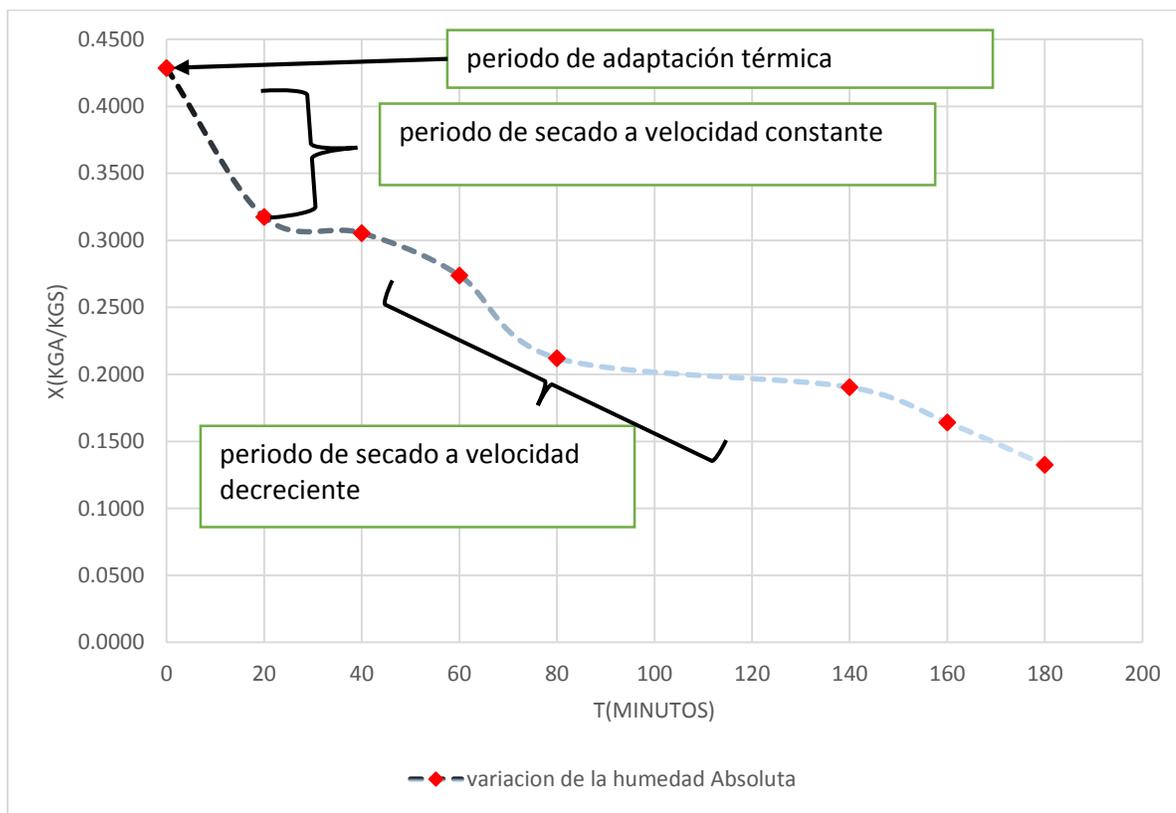


Figura n° 4.32: Periodos en la variación de la humedad absoluta para F=1263kg

Velocidad de secado

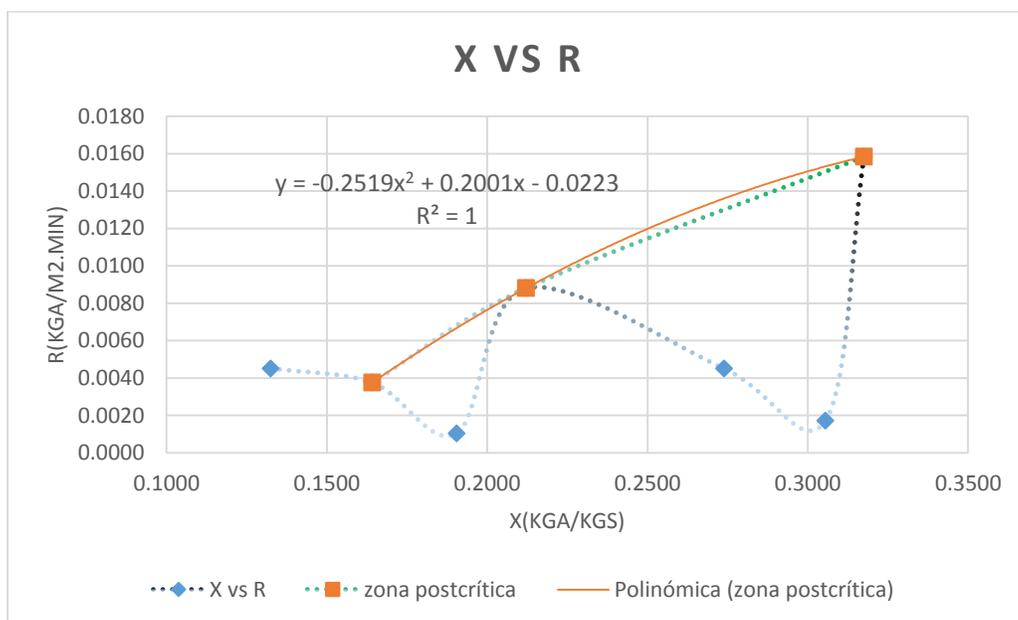


Figura n° 4.33: Periodos de secado en X vs R para F=1263kg.

c). Para una carga $F_0 = 1250 \text{ kg}$ en el secador solar

Tabla n° 4.9: Datos de curvas y velocidad de secado para una carga húmeda (F) de 1575kg.

hora inicio: 11am final: 3.20pm
 Tiempo de secado: 4 horas y 20min.

Fo (kg)	1250		F (kg)	1575	Sp (kg)	1102.50	Area(m ²)	310
Xfo	11.8%		Xf	30%	xw	11.80%		

i	t(min)	%H(base húmeda)	x	X $\left[\frac{kg_A}{kg_S}\right]$	R $\left[\frac{kg_A}{m^2 \cdot min}\right]$
1	0	30	0.3	0.4286	
2	20	29.2	0.292	0.4124	0.0029
3	40	28.5	0.285	0.3986	0.0025
4	60	24.4	0.244	0.3228	0.0135
5	80	22.9	0.229	0.2970	0.0046
6	140	21	0.21	0.2658	0.0018
7	160	17.4	0.174	0.2107	0.0098
8	180	14.9	0.149	0.1751	0.0063
9	200	14.3	0.143	0.1669	0.0015
10	220	13.8	0.138	0.1601	0.0012
11	240	12.5	0.125	0.1429	0.0031
12	260	11.8	0.118	0.1338	0.0016

Variación de la Humedad absoluta

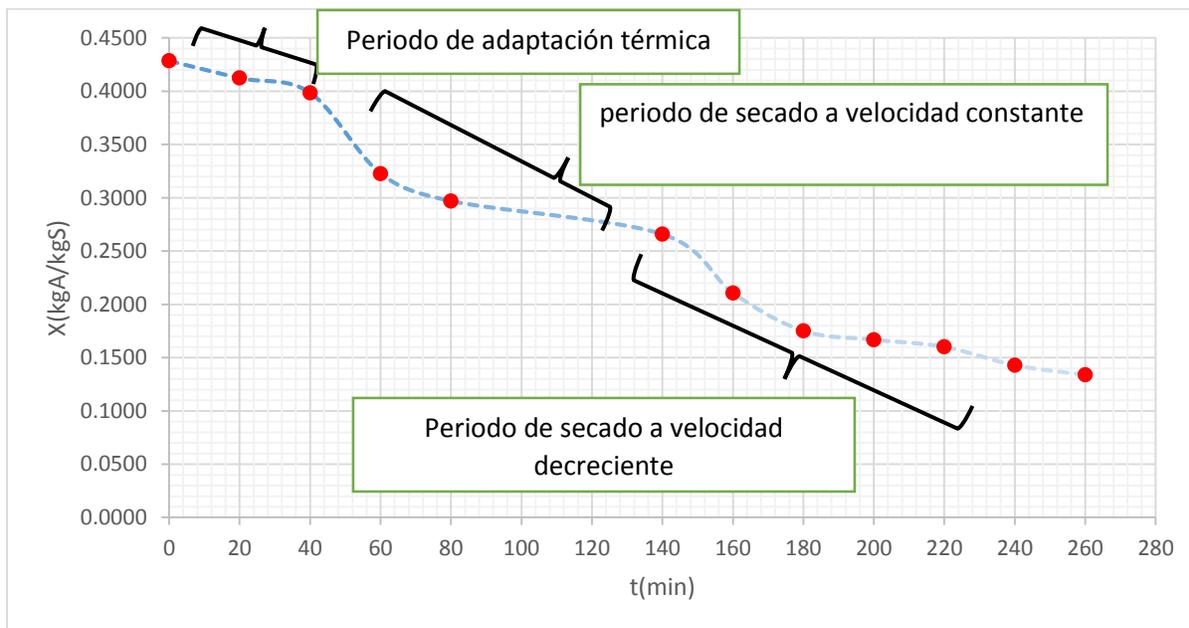
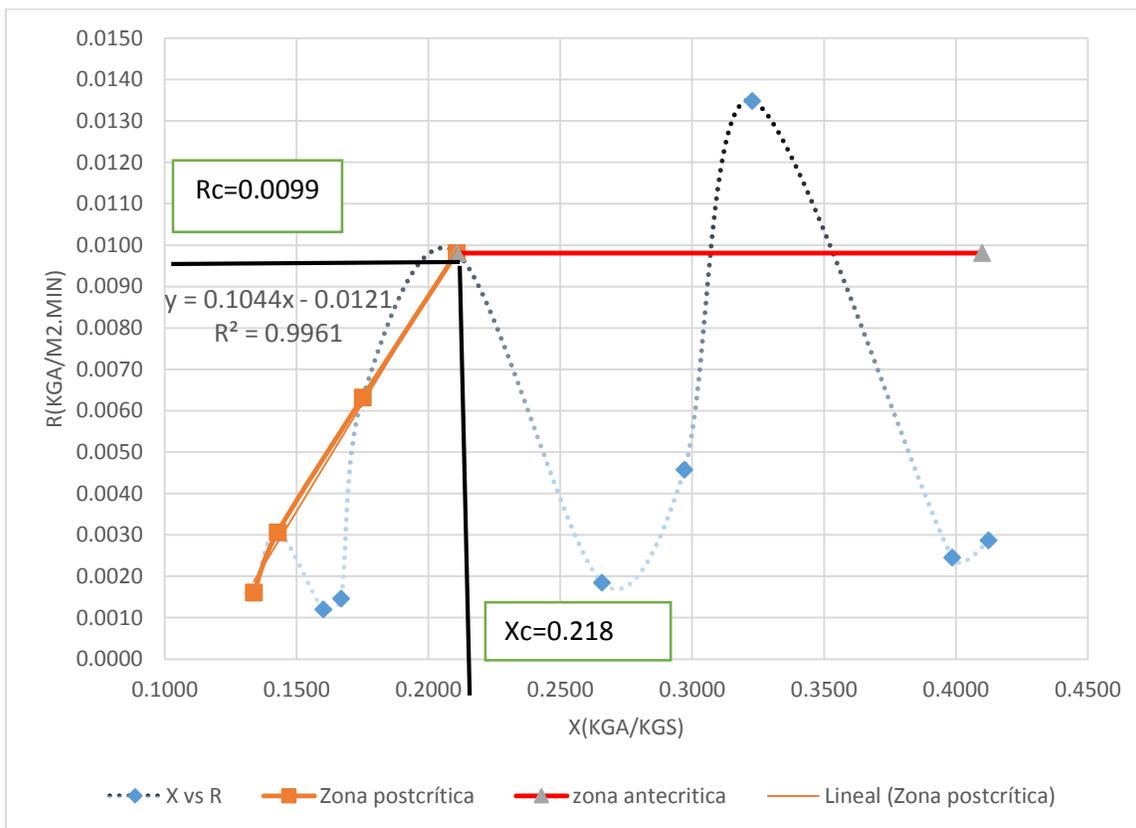


Figura n° 4.34: Periodos en la variación de la humedad absoluta para F=1575kg

Velocidad de secado

Figura n° 4.35: Periodos de secado en X vs R para $F=1575\text{kg}$ d). Para una carga $F_o = 1500\text{ kg día soleado}$

hora de inicio secador solar :11.30-final 4.30pm

Tiempo de secado: 5 horas.

Tabla n° 4.10: Datos de curvas y velicad de secado para una carga humedad (F) de 1890 kg.

F_o (kg)	1500		F (kg)	1890	S_p (kg)	1323.00	Área m^2	310
X_{fo}	0.118		X_f	0.3	x_w	0.116		

i	t(min)	%H(base húmeda)	x	$X \left[\frac{\text{kg}_A}{\text{kg}_S} \right]$	$R \left[\frac{\text{kg}_A}{\text{m}^2 \text{ min}} \right]$
1	0	30	0.3	0.4286	
2	10	29.6	0.296	0.4205	0.0035
3	30	28.5	0.285	0.3986	0.0047
4	50	26.8	0.268	0.3661	0.0069
5	70	24.8	0.248	0.3298	0.0078

Continuación de la tabla n° 4.10					
6	90	22.6	0.226	0.2920	0.0081
7	110	21.6	0.216	0.2755	0.0035
8	130	20.8	0.208	0.2626	0.0027
9	150	19.7	0.197	0.2453	0.0037
10	170	18.5	0.185	0.2270	0.0039
11	180	17.8	0.178	0.2165	0.0045
12	190	16.2	0.162	0.1933	0.0099
13	210	14.5	0.145	0.1696	0.0051
14	230	13.8	0.138	0.1601	0.0020
15	250	13.2	0.132	0.1521	0.0017
16	270	12.4	0.124	0.1416	0.0022
17	300	11.6	0.116	0.1312	0.0015

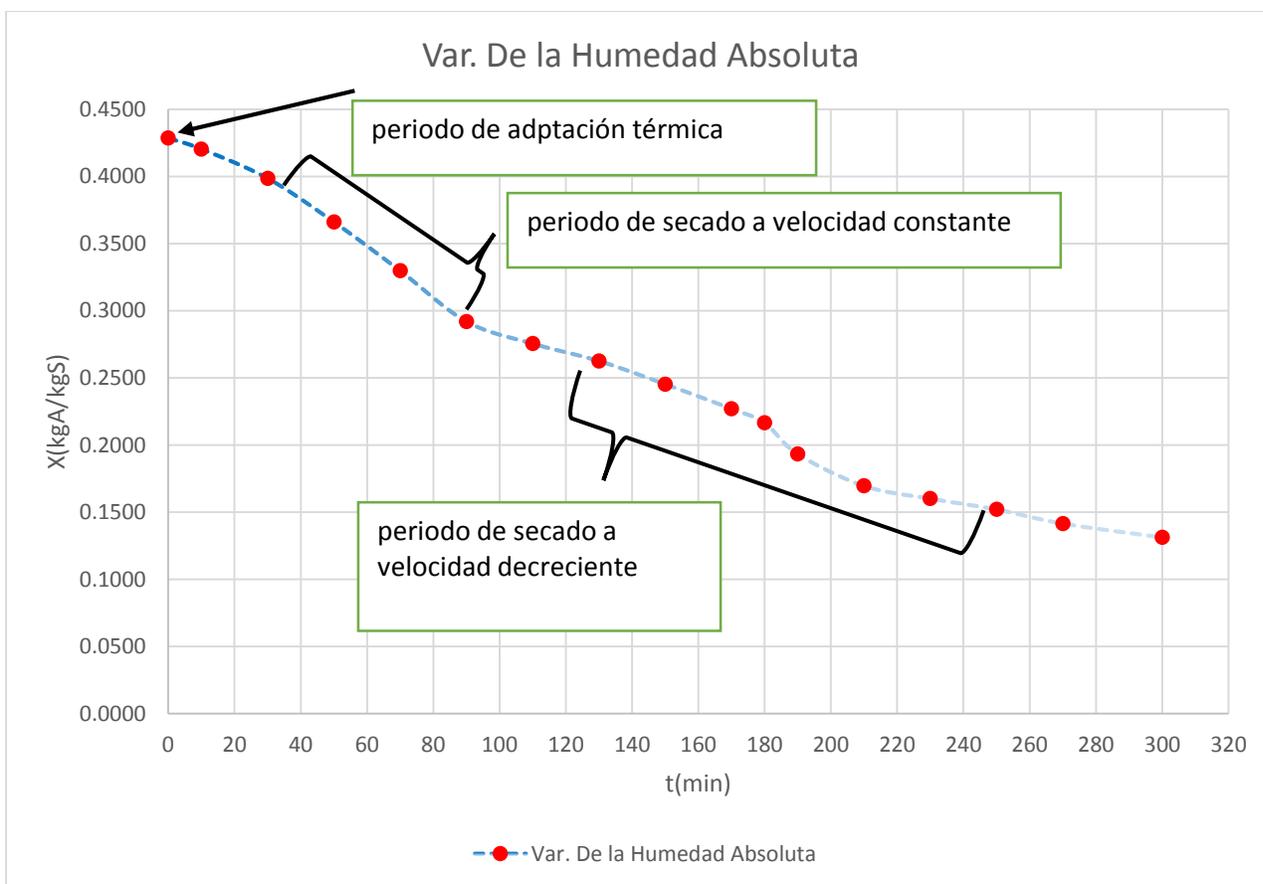


Figura n° 4.36: Periodos en la variación de la humedad absoluta para $F=1890\text{kg}$

Velocidad de secado

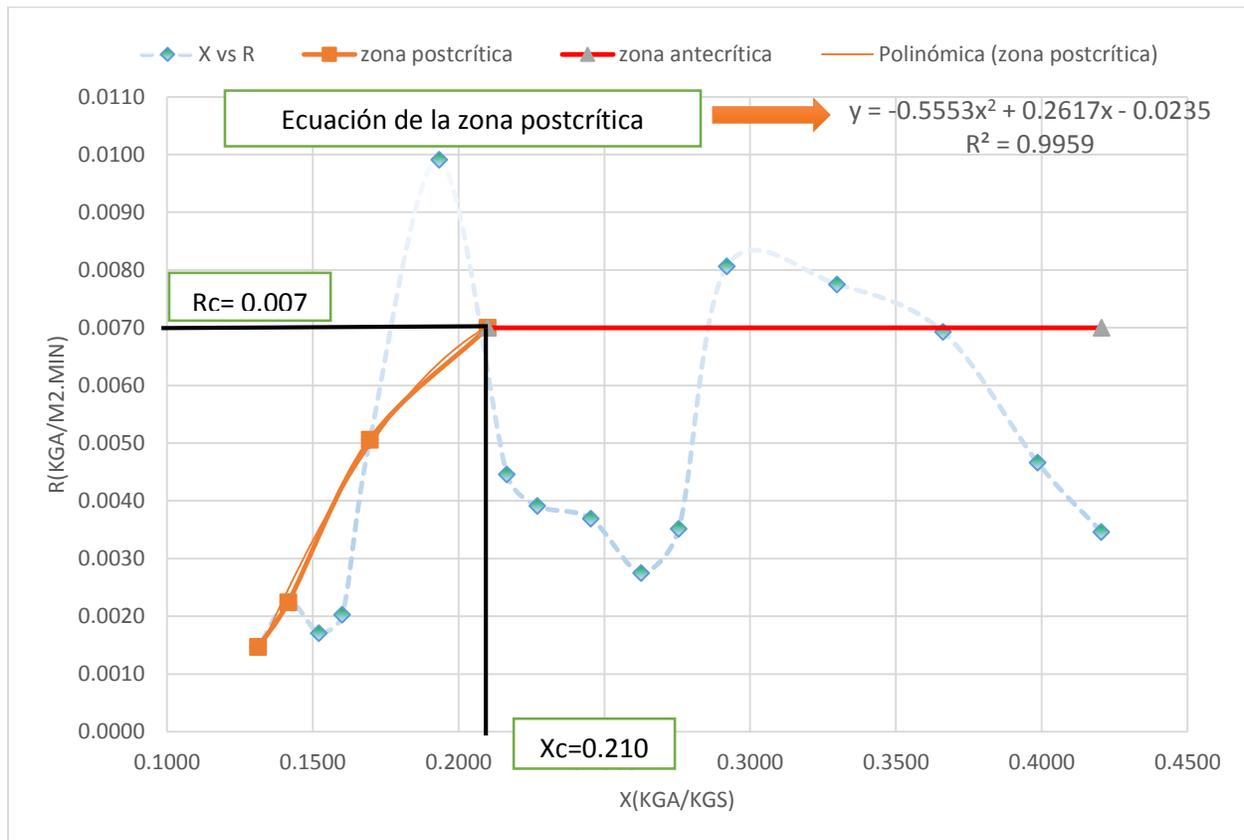


Figura n° 4.37: Periodos de secado en X vs R para F=1890kg

4.5.6. Balance de materia y energía de los granos

Balance de materia

a). En la carga sólida

Para una $F_o = 1500$ kg

$$F = W + V$$

$$F \cdot x_F = W \cdot x_W + V$$

$$Sp \cdot X_F = Sp \cdot X_W + V$$

$$V = Sp(X_F - X_W)$$

Datos:

$$F_o = 1500 \quad x_{F_o} = 0.118$$

$$x_F = 0.33 \qquad x_W = 0.116$$

$$S_p = F_o(1 - X_{Fo}) = F(1 - X_F) = W(1 - x_W)$$

De la siguiente ecuación se tiene:

$$F = 1974.63 \text{ kg}$$

$$S_p = 1323 \text{ kg}$$

$$W = 1496.61 \text{ kg}$$

$$V = 478.02 \text{ kg}$$

V: vapor total eliminado durante el secado del sólido.

Flujo de vapor transferido desde la carga solida al gas de secado para 6 horas de secado.

$$m_V = \frac{V}{\theta_s} = \frac{478.02 \text{ kg}}{6 \text{ h}} = 79.67 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Caracterizando el aire ambiental y el aire húmedo al interior del secador solar, para ello se usó el diagrama Psicrométrico a 548 mmHg extraído de la siguiente Fuente (Arias, 2011, pág. 472)

Además el diagrama Psicrométrico a 548 mmHg está en el anexo n° 4

Aire ambiental:

Datos:

Hr aire=32%

T° promedio de aire= 22 °C

Del diagrama psicrométrico se tiene:

$$\text{humedad absoluta} = h_{a1} = 0.0061 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}}$$

$$\text{temperatura de bulbo húmedo} = t_{bh} = 11 \text{ °C}$$

$$\text{temperatura de rocío} = 3 \text{ °C}$$

$$\text{Volumen específico} = 0.82 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire}}$$

Aire húmedo al interior del secador solar

Datos:

Hr aire=35%

T° promedio de aire= 36 °C

Del diagrama psicrométrico se tiene:

$$\text{humedad absoluta} = h_{a2} = 0.0184 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}}$$

$$\text{temperatura de bulbo húmedo} = t_{bh} = 23.1 \text{ °C}$$

$$\text{temperatura de rocío} = 18.8 \text{ °C}$$

$$\text{Volumen específico} = 0.868 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire}}$$

b). En la corriente gaseosa para el secado

$$\text{Gas seco(B)aire} : G_p = \left[G_{p1} = \frac{Q_1}{V_1} \right] = \left[G_{p2} = \frac{Q_2}{V_2} \right]$$

$$\text{Vapor (A)} = G_p \cdot ha_1 + m_V = G_p \cdot ha_2$$

$$m_V = G_p \cdot (ha_2 - ha_1) = \frac{Sp}{\theta_s} (X_F - X_W)$$

Reemplazando datos se tiene:

$$G_p = \frac{m_V}{ha_2 - ha_1} = \frac{79.67 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{\left[0.0184 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} - 0.0061 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} \right]} = 6477.24 \frac{\text{kg}_B}{\text{h}}$$

$$Q_1 = G_p V_1 = 6477.24 \frac{\text{kg}_B}{\text{h}} \times 0.82 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire}} = 5311.34 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_2 = GpV_2 = 6477.24 \frac{kg_B}{h} \times 0.868 \frac{m^3}{kg \text{ aire}} = 5622.24 \frac{m^3}{h}$$

Balance de energía

a). En la carga solida

La energía térmica neta que requiere la carga sólida para el secado al interior de la cámara es:

$$Q_S = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

Para una carga húmeda que ingresa al secador solar de 1992.54 kg.

Temperatura de interface sólida y de descarga

De la caracterización del aire húmedo al interior del secador solar, que es la purga permanente, se tiene $T_W = T_{IS} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$

Datos adicionales y determinación de calor neto requerido para el secado del grano:

$$Cp_A = 1,0 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \text{ (agua líquida)}$$

$$Cp_V = 0.46 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \text{ (vapor de agua)}$$

$$\lambda_{T_{IS}} \text{ a } 36 \text{ }^\circ\text{C} = 666.07 \frac{kcal}{kg}$$

$$\text{Calor específico de la quinua} = 1.55 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} = 0.37045 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C}$$

$T_F = 15^\circ\text{C}$ temperatura a la que entra el grano humedo al secador.

$$Q_1 = Sp \cdot Cp_S \cdot (T_W - T_F) = 1323 \text{ kg} * 0.37045 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} * (36 \text{ }^\circ\text{C} - 15 \text{ }^\circ\text{C}) = 10292.21 \text{ kcal}$$

$$Q_2 = (Sp \cdot X_F) \cdot Cp_A \cdot (T_{IS} - T_F) = (1323 \text{ kg} \times 0.1312) * 1,0 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C} * (36 \text{ }^\circ\text{C} - 15 \text{ }^\circ\text{C}) = 3645.13 \text{ kcal}$$

$$Q_3 = V \cdot \lambda_{T_{IS}} = 478.02 \text{ kg} \times 666.07 \frac{kcal}{kg} = 318394.78 \text{ kcal}$$

$$Q_4 = (Sp \cdot X_W) \cdot Cp_A \cdot (T_W - T_{IS}) = 1323 \text{ kg} \times 0.4925 \times 1,0 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \times (36 \text{ }^\circ\text{C} - 36 \text{ }^\circ\text{C}) = 0 \text{ kcal}$$

$$Q_5 = V \cdot Cp_V \cdot (T_g - T_{IS}) = 478.02 \text{ kg} \times 0.46 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \times (39 \text{ }^\circ\text{C} - 36 \text{ }^\circ\text{C}) = 659.67 \text{ kcal}$$

$$Q_S = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 332991.79 \text{ kcal.}$$

$$q_S = \frac{Q_S}{\theta_S} = \frac{332991.79 \text{ kcal.}}{6 \text{ h}} = 55498.63 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Determinando las entalpías específicas del sólido ($T_0=0^\circ\text{C}$, referencia) y efectuando un balance de energía térmica neta alrededor del equipo se tiene:

$$H_F = (C_{PS} + C_{PA}X_F)(T_F - T_0) = \left(0.37045 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}} + 1,0 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}} * 0.1312\right)(15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$$

$$H_F = 7.525 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}_S}$$

$$H_W = (C_{PS} + C_{PA}X_W)(T_W - T_0) = \left[0.37045 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}} + 1,0 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}} * 0.4925\right](36^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$$

$$H_W = 31.066 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}_S}$$

$$q = \frac{S_P}{\theta_S} [H_W - H_F] + G_P(ha_2 - ha_1)$$

$$q = \frac{1323 \text{ kg}}{6 \text{ h}} \left(31.066 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}_S} - 7.525 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}_S}\right) + 6477.24 \frac{\text{kg}_B}{\text{h}} * (0.0184 - 0.0061) \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}}$$

$$q = 5270.46 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

- El flujo de energía o potencia térmica neta que requiere el secador para la deshidratación de los granos de quinua es: $q = 5270.46 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$, que involucra el calor neto interno demandado por el secado del sólido: $q_S = 55498.63 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$ mas el calor necesario para el calentamiento del aire fresco admitido hacia la cámara de secado. El flujo neto de energía de energía térmica no incluye el calentamiento previo del secador solar, ni las pérdidas de calor hacia el medio ambiente las que deberán calcularse como

$$q_{real} = q + \sum q_{pérdidas}$$

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. PERFIL DE TEMPERATURA DEL SECADOR SOLAR:

Se detalla a continuación la curva de temperatura del secador solar en día soleado, poco soleado y la temperatura en el ambiente exterior.

En la Figura n° 4.29: Perfil de temperatura se observa que:

- Muy notoriamente se observa que la temperatura dentro del domo es superior al exterior (local) debido al efecto invernadero, Aunque este efecto es el desarrollado por la Tierra para ser calentada, también se le llama a la confinación de aire caliente en el interior de un habitáculo por la acción de la radiación solar que atraviesa un plástico o vidrio, pero que éste es opaco a la radiación terrestre. De esta manera, parte de la radiación solar pasa a través del material transparente o semitransparente, denominada radiación de onda corta, llega al suelo, parte es absorbida y la otra reflejada. La radiación reflejada es la de onda larga o infrarroja y una parte no atraviesa el vidrio o plástico, siendo reflejada, quedándose en el interior y calentando el aire interno.
- La temperatura máxima a la cual se llega en el interior del secador es 45.1 °C, lo que significa que no excede la temperatura que dice la bibliografía que es 50°. Si la temperatura excede los 50°C los granos puede sufrir desnaturalización.
- Comparado con la temperatura local el perfil de temperatura del secador el siempre mayor por más que el clima sea regular (medio soleado) o nublado, esto debido a que el aire se mantiene caliente dentro del secador la cual se va circulando el aire caliente con la velocidad del viento.

5.2. CURVAS Y VELOCIDAD DE SECADO

5.2.1. Para una carga $F_0 = 1500$ kg. (Día nublado).

La quinua lavada de la centrifuga sale con una humedad de 30 a 35 % y ésta es llevada al secador. Se va a presentar comparaciones con el secado antiguo (patio) y el secador solar. El porcentaje de humedad aceptable es 11%.

- el tiempo de secado de la quinua en el secador es menor que el del patio, y esto es un punto más a favor del secador.
- En el secador no hay contaminación de hojas, hojuelas, piedrecillas. Hecho que se daba en el secado en el patio.
- 1500 kg de quinua secó en 7 horas en el secador, mientras que en el patio casi 10 horas. logrando una ventaja de 3 horas por parte del secador en una día nublado.

a). Variación de humedad absoluta

Las figuras n°4.30 muestran las gráficas de la variación de la humedad absoluta:

- Como se sabe que al poner en contacto una carga de sólido húmedo, en éste caso granos de quinua lavada con una humedad (30-35%) con una corriente de aire a una determinada humedad que depende del tiempo solar o condiciones climáticas de Huamanga, se puede reportar la disminución gradual del peso de sólidos en el transcurso de tiempo como una repuesta a la perdida de material debido a la evaporación y eliminación gradual del agua contenido en los granos de quinua la cual da lugar a curvas de secado así como la determinación de los periodos de secado y velocidad de secado.
- En la curva de variación de la humedad absoluta se puede identificar con mucha claridad los 3 periodos del secado: adaptación térmica, secado a velocidad constante y secado se velocidad decreciente; a continuación se muestra los periodos de secado.
- En los primeros 10 a 15 minutos se nota una pequeña adaptación térmica, normalmente este periodo es irrelevante.
- De 30 a 140 minutos se observa un secado a velocidad constante, se caracteriza porque la tasa de pérdida de líquido por parte del material sólido se mantiene aproximadamente constante conforme transcurre el secado, éste fenómeno se presenta cuando existen abundante liquido libre en el material sólido.

- Desde los 180 minutos de secado se nota variaciones, lo que significado que el secado se da a una velocidad decreciente, se caracteriza por la disminución gradual de la tasa de eliminación del líquido, con una reducción progresiva de la evacuación del líquido desde la región intrapartícula del sólido.

b). Velocidad de secado

Las figuras n° 4.31 se muestra la gráfica X vs R

- la velocidad de secado representa la tasa del líquido eliminado desde el sólido por evaporación en un intervalo de tiempo y por cada unidad de área o superficie de secado disponible.
- También a la curva de velocidad de secado se puede entender como el flujo másico de líquido eliminado por cada superficie unitaria de secado.
- En la gráfica X vs R el conjunto de puntos del gráfico se dividen en 2 grupos, los que definen la zona antecrítica o de velocidad constante, ajustados a una línea horizontal, y el resto de los puntos se definen zona postcrítica o de velocidad decreciente, que se ajustan apropiadamente a una línea recta.
- La zona antecrítica es el periodo de secado a velocidad constante
- La zona postcrítica es el periodo de secado a velocidad decreciente.
- La curva de XvsR tiene una gran importancia que consolida los principales parámetros de la velocidad de secado que son la humedad crítica $X_C = 0.32 \frac{KgA}{KgB}$ y la velocidad de secado constante $R_C = 0.0075 \frac{kgA}{m^2min}$, determinados en el punto de inflexión denominado punto crítico o de frontera entre los dos periodos fundamentales de secado que son el de velocidad d secado constante o zona antecrítica y el de velocidad decreciente o zona postcrítica.

5.2.2. Para una carga Fo= 1000 kg : Día soleado

a). Variación de humedad absoluta

La figura n° 4.32 muestra la variación de la humedad absoluta.

- En la curva de variación de la humedad absoluta se puede identificar con mucha claridad los 3 periodos del secado: adaptación térmica, secado a velocidad constante y secado se velocidad decreciente; a continuación se muestra los periodos de secado.

- En los primeros 5 minutos se nota una pequeña adaptación térmica, normalmente este periodo es irrelevante.
- De 5 a 20 minutos se observa un secado a velocidad constante, se caracteriza porque la tasa de pérdida de líquido por parte del material sólido se mantiene aproximadamente constante conforme transcurre el secado, éste fenómeno se presenta cuando existen abundante líquido libre en el material sólido.
- Desde los 20 minutos de secado se nota variaciones, lo que significado que el secado se da a una velocidad decreciente, se caracteriza por la disminución gradual de la tasa de eliminación del líquido, con una reducción progresiva de la evacuación del líquido desde la región intrapartícula del sólido.

b). Velocidad de secado

Las figuras n° 4.33 se muestra la gráfica X vs R

- la velocidad de secado representa la tasa del líquido eliminado desde el sólido por evaporación en un intervalo de tiempo y por cada unidad de área o superficie de secado disponible.
- También a la curva de velocidad de secado se puede entender como el flujo másico de líquido eliminado por cada superficie unitaria de secado.
- En la gráfica X vs R el conjunto de puntos del gráfico solo se observa una zona, los que definen la zona postcrítica o de velocidad decreciente, que se ajustan apropiadamente a un polinomio de segundo orden. $y = -0.2519x^2 + 0.2001x - 0.0223$
 $R^2 = 1$
- La zona postcrítica es el periodo de secado a velocidad decreciente.
- La curva de XvsR tiene una gran importancia que consolida los principales parámetros de la velocidad de secado, pero en este caso no se observa el Xc y Rc

5.2.3. Para una carga Fo= 1250 kg (día soleado)

a). Variación de humedad absoluta

La figura n° 4.34 muestra la variación de la humedad absoluta.

- En la curva de variación de la humedad absoluta se puede identificar con mucha claridad los 3 periodos del secado: adaptación térmica, secado a velocidad constante y secado a velocidad decreciente; a continuación se muestra los periodos de secado.
- En los primeros 35 a 40 minutos se nota una pequeña adaptación térmica, normalmente este periodo es irrelevante.
- De 40 a 80 minutos se observa un secado a velocidad constante, se caracteriza porque la tasa de pérdida de líquido por parte del material sólido se mantiene aproximadamente constante conforme transcurre el secado, éste fenómeno se presenta cuando existen abundante líquido libre en el material sólido.
- Desde los 80 minutos de secado se nota variaciones, lo que significa que el secado se da a una velocidad decreciente, se caracteriza por la disminución gradual de la tasa de eliminación del líquido, con una reducción progresiva de la evacuación del líquido desde la región intrapartícula del sólido.

b). Velocidad de secado

Las figura n° 4.35 se muestra la gráfica X vs R

- la velocidad de secado representa la tasa del líquido eliminado desde el sólido por evaporación en un intervalo de tiempo y por cada unidad de área o superficie de secado disponible.
- También a la curva de velocidad de secado se puede entender como el flujo másico de líquido eliminado por cada superficie unitaria de secado.
- En la gráfica X vs R el conjunto de puntos del gráfico se dividen en 2 grupos, los que definen la zona antecrítica o de velocidad constante, ajustados a una línea horizontal, y el resto de los puntos se definen zona postcrítica o de velocidad decreciente, que se ajustan apropiadamente a una línea recta.
- La zona antecrítica es el periodo de secado a velocidad constante
- La zona postcrítica es el periodo de secado a velocidad decreciente.
- La curva de XvsR tiene una gran importancia que consolida los principales parámetros de la velocidad de secado que son la humedad crítica $X_C = 0.218 \frac{KgA}{KgB}$ y la velocidad de secado constante $R_C = 0.0099 \frac{kgA}{m^2min}$, determinados en el punto de inflexión

denominado punto crítico o de frontera entre los dos periodos fundamentales de secado que son el de velocidad de secado constante o zona antecrítica y el de velocidad decreciente o zona postcrítica.

5.2.4. Para una carga $F_0 = 1500$ kg (día soleado)

a). Variación de humedad absoluta

La figura n° 4.36 muestra la variación de la humedad absoluta.

- En la curva de variación de la humedad absoluta se puede identificar con mucha claridad los 3 periodos del secado: adaptación térmica, secado a velocidad constante y secado a velocidad decreciente; a continuación se muestra los periodos de secado.
- En los primeros 5 a 10 minutos se nota una pequeña adaptación térmica, normalmente este periodo es irrelevante.
- De 30 a 90 minutos se observa un secado a velocidad constante, se caracteriza porque la tasa de pérdida de líquido por parte del material sólido se mantiene aproximadamente constante conforme transcurre el secado, éste fenómeno se presenta cuando existen abundante líquido libre en el material sólido.
- Desde los 100 minutos de secado se nota variaciones, lo que significa que el secado se da a una velocidad decreciente, se caracteriza por la disminución gradual de la tasa de eliminación del líquido, con una reducción progresiva de la evacuación del líquido desde la región intrapartícula del sólido.

c). Velocidad de secado

La figura n° 4.37 muestra la gráfica X vs R

- la velocidad de secado representa la tasa del líquido eliminado desde el sólido por evaporación en un intervalo de tiempo y por cada unidad de área o superficie de secado disponible.
- También a la curva de velocidad de secado se puede entender como el flujo másico de líquido eliminado por cada superficie unitaria de secado.
- En la gráfica X vs R el conjunto de puntos del gráfico se dividen en 2 grupos, los que definen la zona antecrítica o de velocidad constante, ajustados a una línea horizontal, y el

resto de los puntos se definen zona postcrítica o de velocidad decreciente, que se ajustan apropiadamente a una línea recta.

- La zona antecrítica es el periodo de secado a velocidad constante
- La zona postcrítica es el periodo de secado a velocidad decreciente.
- La curva de X vs R tiene una gran importancia que consolida los principales parámetros de la velocidad de secado que son la humedad crítica $X_C = 0.210 \frac{KgA}{KgB}$ y la velocidad de secado constante $R_C = 0.007 \frac{kgA}{m^2min}$, determinados en el punto de inflexión denominado punto crítico o de frontera entre los dos periodos fundamentales de secado que son el de velocidad d secado constante o zona antecrítica y el de velocidad decreciente o zona postcrítica.

5.2.5. Balance de materia y energía de los granos

- El aire fresco que debe admitirse hacia el secador solar debe ser permanentemente de $5311.34 \frac{m^3}{h}$, que luego de ser humidificado por el secado de los sólidos debe purgarse también permanentemente a razón de $5622.24 \frac{m^3}{h}$; este flujo garantiza que el gas al interior de la cámara de secado no alcance el punto de saturación deteniendo el secado.
- El balance de energía térmica neta que requiere la carga sólida Q_S para alcanzar el secado en el tiempo neto de secado al interior de la cámara de secado batch, que se desarrolla exclusivamente para un calentamiento directo y adiabático de la carga sólida, que toma sus requerimientos de energía térmica por convección térmica desde la corriente gaseosa y también de la radiación solar.

La energía térmica neta que requiere la carga sólida para el secado al interior de la cámara es:

$$Q_S = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 332991.79 \text{ Kcal.}$$

$$q_s = \frac{Q_S}{\theta_S} = \frac{332991.79 \text{ Kcal.}}{6 \text{ h}} = 55498.63 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

El balance de energía requiere establecer las temperaturas tanto en carga sólida y en la corriente gaseosa al interior de la cámara de secado.

- El flujo de energía o potencia térmica neta que requiere el secador para la deshidratación de los granos de quinua es: $q_{solidos} = 55498.63 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$.

- La energía térmica que aporta el sol hacia el secador es de $q_{solar} = 199325.05 \frac{kcal}{h}$, y de éste valor el aire captura $q_{util} = 71055.21 \frac{kcal}{h}$ y finalmente es entregado a los solidos $q_{solidos} = 55498.63 \frac{kcal}{h}$.
- La eficiencia del rendimiento térmico del secador solar es 35.6%.

5.3. RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE SECADOR, ESPESOR DE QUINUA EN EL SECADOR, TIEMPO DE SECADO

Tabla n° 5.1: Capacidad del secador solar, altura de lecho y tiempo de secado:

			materia prima que entra al lavado		solido portante	carga húmeda que ingresa al secador solar		producto seco		tiempo se secado	
COLOR	n° de ensayo	espesor de quinua	Fo(Kg)	%H	Kg	F (kg)	%H	W (kg)	%H		
QUINUA BLANCA	1*	1.8	1500	11	1335	1992.54	33	1500.00	11	7h 50 min	8am-3.50pm
	2	1.4	1250	12	1100	1666.67	34	1244.34	11.6	4h 20min	11am-3.20pm
	3	1	1000	11.6	884	1300.00	32	1002.27	11.8	3h	11am-2pm
	4	0.5	750	11.8	661.5	1002.27	34	748.30	11.6	2h 30min	9.30pm-12pm
	5	1.7	1500	11.6	1326	1979.10	33	1503.40	11.8	6h	9am-3pm
	6	1.4	1250	11.4	1107.5	1628.68	32	1255.67	11.8	5h 30min	8am-1.30pm
	7	1.4	1250	11.8	1102.5	1645.52	33	1247.17	11.6		4pm-10am
QUINUA NEGRA	8	1.6	1500	12	1320	1913.04	31	1496.60	11.8		3pm-9am
	9	1.3	1250	11.8	1102.5	1645.52	33	1247.17	11.6	4h 30min	12pm-4.30pm
	10	1.5	1500	11.6	1326	1950.00	32	1503.40	11.8	5.30min	9am-2.30pm

*día muy nublado

- En el cuadro se observa muy claramente el detalle de cada carga húmeda al secador solar; se muestran en un total de 10 ensayos y cada uno cuenta con todo los datos de ingreso, durante y después del secado. Y también se puede observar que tiempo demora en secar.

5.4. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE FACTORES QUE INFLUYEN EN EL SECADO DE LOS GRANOS

- Para determinar el tiempo de secado se tomó en cuenta varios factores, que entre ellos tenemos: el porcentaje de humedad con la que ingresa la quinua al secador solar, luego de tantas mediciones; la quinua entra al secador solar con un porcentaje de humedad de 30-35% (mayor contenido de agua mayor tiempo de secado). Lo más importante es éste punto es la operación de centrifugación, debido a que la quinua una vez que pase por el tanque lavador pasa por la centrifuga, y es aquí donde se tiene que dar 80 segundos de centrifugación para lograr que la quinua salga con 30% de humedad.
- Otro factor muy importante también es la temperatura del aire del interior del secador solar (domo), mayor temperatura en el domo menor será el tiempo de secado, todo depende del tiempo climatológico de la ciudad, es por ello que se trabajó bastante en tiempos diversos para así saber qué cantidad secar. Porque no se puede secar la misma cantidad en un día soleado comparado con un día nublado o quizá lluvioso.
- Humedad relativa el aire (mayor humedad relativa, mayor tiempo de secado), depende del ambiente climatológico de la ciudad, otro factor a tener en cuenta es la velocidad de viento (la velocidad de viento según bibliografías en un día normal varía de 0.1 a 0.8 m/s (mayor velocidad del aire, menor tiempo de secado). Como es un secador natural indirecto dependemos de la velocidad del viento, es por ello que existe ventanas auxiliares para mejorar la velocidad el flujo de aire dentro del secador.
- El removido de la masa de quinua es también muy importante, para homogenizar la masa tendida, de modo que el secado sea equitativo.

5.5. RESULTADOS SOBRE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE PLANTA CON EL SECADOR SOLAR

A continuación se muestra un reporte anual 2016 de la producción de la planta, en la que se observará como notablemente la cantidad de materia prima procesada (quinua), mejora muy notoriamente

Tabla n° 5.2: Capacidad de producción o de materia prima Wari Group S.A.C

MESES	MATERIA		TOTAL(Kg)
	PRIMA ANDES	QALY WARMA	
dic.2015-Enero	30770		30770.00
FEBRERO	18260.85		18260.85
MARZO	36302.6	5728.5	42031.10
ABRIL	38787.98		38787.98
MAYO	28851.45	5742.35	34593.80
JUNIO	6267.25	834.05	7101.30
JULIO	13849.05	11307.4	25156.45
AGOSTO	26222.6	1027.45	27250.05
SEPTIEMBRE	42646.99	18769.8	61416.79
OCTUBRE	38756.84	8765.45	47522.29
NOVIEMBRE	37857.68	8757.58	46615.26
DICIEMBRE	5181.9		5181.90
total			384687.77

*el mes de agosto solo se trabajó 15 días.

- La construcción del secador solar se realizó los meses de abril, mayo, junio.
- La evaluación de parámetros del secador se hizo los meses de agosto, setiembre y octubre.
- El funcionamiento del secador se dio a partir de agosto.
- Setiembre en un mes que servirá con base de capacidad de producción, se nota muy claramente que en un mes se puede procesar tranquilamente 61 416.79 Kg. De quinua. Antes de la construcción del secador solar la planta procesaba hasta 42 000 kg en un mes, pero ahora con la construcción del secador solar procesa hasta 61416 kg, se puede decir que la capacidad de producción de la planta se incrementó en un 53.5 %.

A partir de setiembre el ingreso de quinua hacia la planta fue minoría debido a que ANDES S.A cliente de WARI GROUP S.A.C tuvo poca compra de quinua.

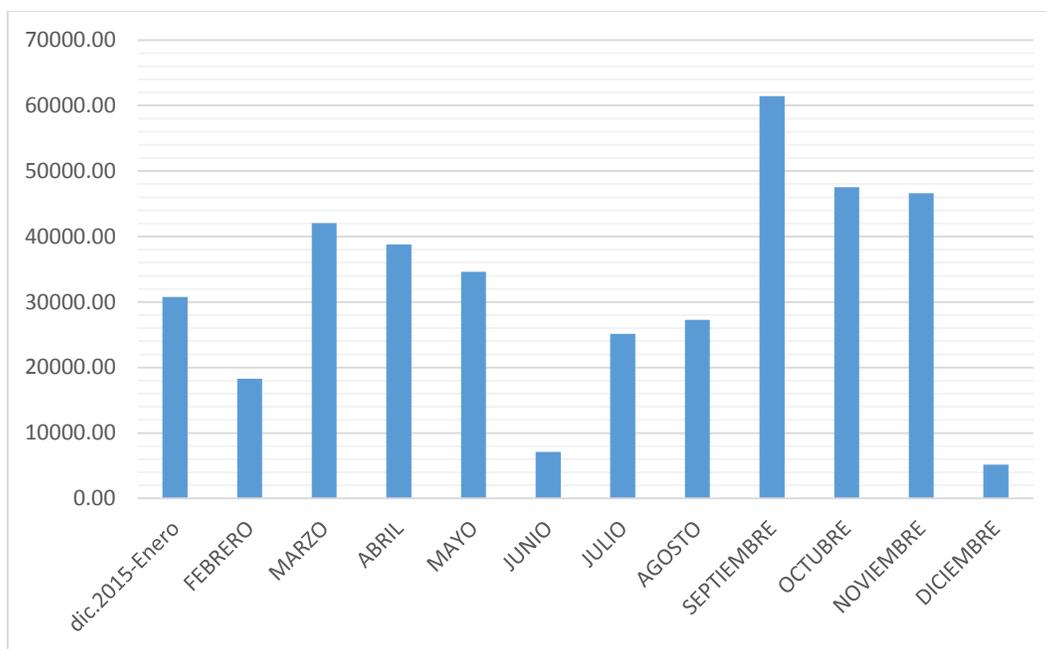


Figura n° 5.1: Diagrama de bloque de materia prima procesada 2016

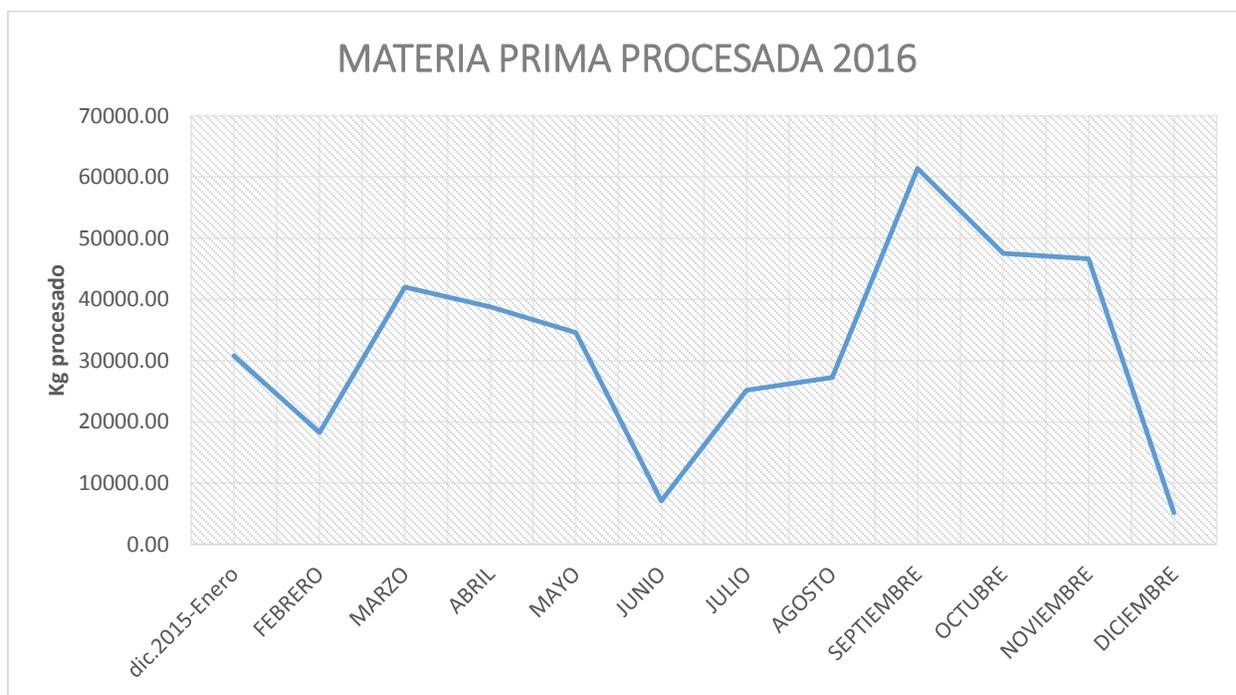


Figura n° 5.2: Materia procesada 2016 Wari Group S.A.C.

CONCLUSIONES

- El diseño, construcción y puesta en marcha de un secador solar tipo invernadero para mejorar la calidad de granos nos permite reducir el tiempo de secado de la quinua comparado con el secado tradicional.
- Se evaluó el secador solar tipo invernadero se hizo a condiciones climatológicas de huamanga.
- Las pruebas de campo del secado de granos de quinua realizados para 1500 kg al 11 % de humedad de materia prima que ingresa al lavado, reporta que el secado en patio es de 8 horas y el tiempo de secado en el secador solar es 5 a 6 horas, lo que significa que el tiempo de secado es menor en el secador solar.
- La energía térmica que aporta el sol hacia el secador es de $q_{solar} = 199325.05 \frac{kcal}{h}$, y de éste valor el aire captura $q_{util} = 71055.21 \frac{kcal}{h}$ y finalmente es entregado a los sólidos $q_{solidos} = 55498.63 \frac{kcal}{h}$.
- La eficiencia del rendimiento térmico del secador solar es 35.6%.
- el tiempo de secado en el secador solar es 37.5 % más rápido que el secado tradicional o en patios.
- Se disminuye la contaminación de los granos con hojuelas, polvos y piedrecillas; además la presencia repentina de lluvias ya no es un problema. Porque una vez que se lave la quinua se tiende en secador solar y aunque llueva o no los granos están a salvo dentro del secador.
- El diseño de cubierta del secador solar se construye de acuerdo al terreno destinado y a condiciones de normal trabajo de los operarios.
- El secador solar tipo domo tiene una cubierta con policarbonato transparente y en las partes laterales inferiores tiene planchas de acero inoxidable que cumple la finalidad de incrementar la radiación hacia la cámara de secado.
- La construcción del secador solar ha cobrado gran importancia ya que requiere menos espacio, se logran granos secos en mayor cantidad y calidad, el periodo de secado es menor.
- El perfil de temperatura del secador solar tipo invernadero es para determinar la temperatura máxima promedio a que se llega en el interior, además en el gráfico de la curva de perfil de temperatura se observa que la temperatura máxima es 45.1°C.

- Los diferentes ensayos de secado para diferentes cargas húmedas de granos de quinua es para determinar el tiempo de secado óptimo.
- Con los datos experimentales para cada ensayo se hace cálculos de humedad de equilibrio, variación de la humedad absoluta, velocidad de secado, curvas de velocidad de secado, balance de materia y energía de los granos.
- En el secador solar la pérdida de agua y contenido de humedad es más rápido en comparación al secad tradicional (en patio o directo) debido a la alta temperatura de contacto. La velocidad de secado en el secador es mayor al secado tradicional.
- El tiempo de secado es variable depende de las condiciones climáticas del lugar y el manejo, según experiencias puede variar de 4 horas hasta 1 día.
- Se emplea del diagrama psicrométrico para determinar características del aire a una determinada temperatura y % de humedad relativa.
- La energía térmica neta que requiere la carga sólida para el secado al interior de secador solar de es $Q_S = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 431742.61 \text{ Kcal}$, para una carga húmeda de 1974.63 kg, donde el sólido portante es 1323 Kg, y la cantidad de agua a evaporar es 478.02Kg.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer la limpieza del secador constantemente para así evitar contaminación alguna. Además se debe de limpiar el techo del secador, debido a que el policarbonato se cubre de polvo y no deja pasar la iluminación solar hecho que influye en el tiempo de secado, ya que la temperatura no llega a su máximo indicador.
- Se debe remover los granos de quinua cada 20 a 30 minutos para homogenizar el porcentaje de humedad, también para mejorar el tiempo de secado.
- El uso de este secador no es propio únicamente de la quinua, sino que se puede utilizar para secar otro tipo de productos como granos y cereales, lógicamente el rendimiento tendrá su variación dependiendo de las propiedades del producto a ser secado.
- Se recomienda no dejar abierta la puerta del secador solar por mucho tiempo, debido a que el aire caliente se libere rápidamente, para ello existen ventanas de ingreso de aire y ventanas auxiliares de ventilación.
- Colocar un termo higrómetro dentro de la secadora, esto nos permitirá monitorear constantemente las condiciones de temperatura y humedad relativa

Bibliografía

1. 1 er voletin de vigilancia. (2008). Tecnología de del secado del café para cooperativa de servicios múltiples centrocafe Perú. España.
2. Almansa , R., & Muñoz, F. (1994). Ingeniería de la Energía Solar. Mexico.
3. Ambrosetti, P. (1979). La energía solar en Ayacucho. Ayacucho: PIENA.
4. Arias Jara, A. (2011). Fundamentos y Aplicaciones de Transferencia de Masa. Ayacucho.
5. Arones Quispe, C. (s.f.). Diseño, Construcción y Evaluación de secadores solares para productos agrícolas. Ayacucho.
6. Asociacion Nacional de cafe. (2006). Guía Técnica de Caficultura. Guatemala.
7. Berrueta Soriano, V. (2004). Secador solar para café. Manual de construcción. Mexico: Foro para el desarrollo sostenible.
8. Besora Magem, J. (2010). Informe técnico para la construcción de un secador solar de café. Guatemala.
9. Fairlie Reinoso, A. (s.f.). La quinua en el Perú cadena exportadora y políticas de gestión ambiental. Pontifica Universidad Católica del Perú.
10. Gobernacion de Huila. (2008). Modelo Piloto de secador solar modular paea café. Colombia: Secretaria de agricultura y minería.
11. Incropera, F. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. Mexico: Cuarta edición.
12. Kadono, C. (1799). La radiacion solar en el Perú. Lima.
13. Larios Saldaña, L. (2004). Diseño y construcción de un deshidratador indirecto de cacao mediante el uso de aire calentado por energía solar. Caracas, Venezuela.
14. Mena Reinoso, A. P. (2015). Análisis estadístico exploratorio de dos tipos de secado de quinua. Ecuador.
15. Moreno, G. (s.f.). Manual De Construcción Y Operación De Una Secadora Solar. Mexico.

16. Muñoz, D., & Cabrera, G. (2006). El secado directo e indirecto de piña. Cauca, Colombia: Universidad del Vale.
17. Norma Técnica Peruana, I. (2014). Norma Técnica Peruana. Lima, Perú: comisión de normalizacion y de fiscalizacion de barreras no arancelarias.
18. Peralta I, E. (2011). La quinua un gran alimento y su utilización. Instituto de investigaciones agropecurias, Ecuador.
19. Peralta, E. (2012). Manual Agrícola de Granos Andinos. Ecuador: tercera edicion .
20. S. Mujundar, E. (2000). Drying Technologies in Food Processing. Monteval.
21. Sánchez Proaño, E. (s.f.). Diseño de secadores solares para la deshidratación de la simbiosis de kombucha con el objeto de aprovechar eficientemente una energía limpia. Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
22. Sigüencia ávila, J. M. (2006). Evaluación de un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita para granos de cacao ccn51. Ecuador.
23. Soria, E. (2006). Diseño y simulación de un secador de granos de cacao con colectores solares planos mediante convección forzada para una capacidad de 500 kg.
24. VITOR, M. O. (2013). Determinacion del Tiempo de Secado de la Quinua usando un secador solar mixto e indirectoen en Ayacucho. Ayacucho.

ANEXOS

Anexo n° 1: Datos de perfil de temperatura

Hora	tiempo (min)	T° día poco soleado dentro del secador	T° día soleado dentro del secador	T° ambiente, secado tradicional
8am	0	22	24.6	15
8:10	10	22.1	25.5	15.3
8.20	20	22.4	26.1	15.4
8.30	30	24.2	26.3	15.4
8.40	40	24.3	27.8	15.9
8.50	50	25.4	28	16
9:00	60	25.5	28.8	16.1
9:10	70	25.7	29.9	16.1
9.20	80	25.9	30.4	17.8
9.30	90	26	31.3	18
9.40	100	26.4	35.2	18.1
9.50	110	27.1	35.4	18.2
10	120	27.8	35.8	18.2
10.1	130	27.9	35.9	18.5
10.2	140	28.8	36.5	18.5
10.3	150	29.4	37.5	18.7
10.4	160	29.8	38.8	19.5
10.5	170	29.9	39.6	19.7
11	180	32.5	41.5	20.5
11.05	185	33.1	41.5	20.5
11.1	190	33.3	42.1	20.6
11.15	195	34.1	41	20.7
11.2	200	35	41.9	20.9
11.25	205	35.4	41.9	21.1
11.3	210	35.5	41	21.1
11.35	215	36.6	42.5	21.3
11.4	220	39.3	42.8	21.4
11.45	225	37.2	43.3	21.5
11.5	230	38	42.9	22
11.55	235	38.7	44.2	22.4
12	240	38.1	44.2	22.6
12.05	245	37.4	43.9	22.7
12.1	250	38.5	43.2	23.2
12.15	255	39.1	43.2	23.5
12.2	260	40.5	43.4	23.6
12.25	265	40.4	45.1	23.7
12.3	270	37.9	44.4	24
12.35	275	38.2	43.5	24.1
12.4	280	37.8	43.4	24.3
12.45	285	40.2	42.9	24.2
12.5	290	39.4	42.9	24.3

Continuación dee anexo n°1: datos de perfil de temperatura				
--	--	--	--	--

12.55	295	37.5	41.9	24.5
13	300	36.7	40.8	24.9
13.05	305	40.5	42.4	25
13.1	310	40.9	43.4	24.8
13.15	315	40	44	25.1
13.2	320	41.8	43.7	25.2
13.25	325	39.7	43.2	25.3
13.3	330	38	41.5	24.9
13.35	335	37.1	39.5	24.9
13.4	340	38	40	24.7
13.45	345	38.1	40.1	24.9
13.5	350	40.5	41.8	25
13.55	355	40.8	42.8	25.1
14	360	41.1	42.9	24.8
14.05	365	41.2	42.5	25.3
14.1	370	40.8	42.8	25.5
14.15	375	40.5	41.8	24.8
14.2	380	40.5	42.3	24.8
14.25	385	40.6	42.6	24.7
14.3	390	40.9	42.8	24.6
14.35	395	41.1	42.4	24.5
14.4	400	39.2	41.8	24.5
14.45	405	38.9	40.5	24.5
14.5	410	38.9	39.8	24.2
14.55	415	37.2	39.6	24.5
15	420	36.8	39.9	23.9
15.1	430	35.8	39.7	23.8
15.2	440	34.1	37.3	23.8
15.3	450	32.7	36.9	23.5
15.4	460	32.4	36.1	23.4
15.5	470	32.1	35.9	23.2
16	480	31.4	35.7	23
16.1	490	31.1	34.7	22.9
16.2	500	30.7	34.6	22.8
16.3	510	30.5	34.6	22.8
16.4	520	30	33.5	22.9
16.5	530	28.9	31.6	22.7
17	540	28.8	31.5	22.3
17.1	550	28.3	30.6	22.2
17.2	560	27.7	29.6	22.1
17.3	570	26.1	27.6	21.6
17.4	580	25.2	27.2	21.5
17.5	590	25.2	26.3	20.5
18	600	25.1	25.8	20.3

Anexo n°2: Norma técnica peruana sobre granos de Quinua

Las hojuelas de quinua cruda deberán cumplir con los requisitos especificados en la Tabla 1.

TABLA 1 – Requisitos físico - químicos de las hojuelas de quinua cruda

Requisitos	Unidad	Valores		Método de ensayo
		Mín.	Máx.	
Humedad	%	-	13,5	AOAC 945.15
Proteínas	%	10	-	AOAC 992.23
Fibra cruda	%	2	-	AOAC 945.38
Cenizas totales	%	-	3,5	AOAC 945.38
Grasa	%	4	-	AOAC 945.38

NOTA:

Los valores referidos están expresados en base seca.

1. Como información al consumidor, los granos de quinua no contienen gluten.
2. Es pertinente declarar los valores de Carbohidratos y Valor Energético como información nutricional del producto.

Las hojuelas de quinua pre-cocida deberán cumplir con los requisitos especificados en la Tabla 2.

Tabla 2 – Requisitos físico-químicos de las hojuelas de quinua pre-cocida

Requisitos	Unidad	Valores		Método de ensayo
		Mín.	Máx.	
Humedad	%	-	13,5	AOAC 945.15
Proteínas	%	9	-	AOAC 992.23
Fibra cruda	%	2	-	AOAC 945.38
Cenizas totales	%	-	3,5	AOAC 945.38
Grasa	%	3,5	-	AOAC 945.38

NOTA:

Los valores referidos están expresados en base seca.

1. Como información al consumidor, los granos de quinua no contienen gluten.
2. Es pertinente declarar los valores de Carbohidratos y Valor Energético como información nutricional del producto.

Los valores establecidos en las tablas precedentes son para hojuelas de quinua, sin vitaminas, minerales ni aditivos alimentarios.

Anexo n° 3: Norma Técnica peruana – Requisitos microbiológicos.

6.3 Requisitos microbiológicos

Las hojuelas de quinua deberán cumplir con los requisitos microbiológicos establecidos en la Tabla 3:

TABLA 3 – Requisitos microbiológicos

Parámetro	Categoría	Clase	n	c	m	M	Métodos de ensayo
Recuento de microorganismos aeróbicos mesófilos viable (ufc/g)	2	3	5	2	10^4	10^6	AOAC 990.12
Numeración de Mohos (ufc/g)	2	3	5	2	10^3	10^4	AOAC 997.02
Numeración de Coliformes (NMP/g)	5	3	5	2	10^2	10^3	ISO 4831
<i>Bacillus cereus</i> (ufc/g)	8	3	5	1	10^2	10^4	AOAC 980.31
<i>Salmonella sp.</i> en 25 g	10	2	5	0	Ausencia	--	AOAC 967.25

En donde:

n = número de unidades de muestra seleccionadas al azar de un lote

m = Límite microbiológico que separa la calidad aceptable de la rechazable. En general, un valor igual o menor a "m", representa un producto aceptable y los valores superiores a "m" indican lotes aceptables o inaceptables.

M = Los valores de recuentos microbianos superiores a "M" son inaceptables.

c = número máximo de unidades de muestra que puede contener un número de microorganismos comprendidos entre "m" y "M". Cuando se detecte un número de unidades de muestra mayor a "c" se rechaza el lote.

ufc = unidades formadoras de colonia

NMP = número más probable

Anexo n°4: Diagrama Psicrométrico a 548mmHg.

