

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

**“CONSTRUCCION DE UN SECADOR POR ATOMIZACION
A NIVEL DE LABORATORIO Y SU EVALUACION EN LA
OBTENCION DE LECHE EN POLVO”**

TESIS PRESENTADA POR

BACH. LISSET ALEJANDRINA CALLA CHACON

BACH. JOVANA CANAZA CAMARGO

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PUNO – PERÚ

2012

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

“CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR POR ATOMIZACIÓN A NIVEL DE
LABORATORIO Y SU EVALUACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LECHE EN
POLVO”

TESIS

PRESENTADO POR:

BACH. LISSET ALEJANDRINA CALLA CHACÓN
BACH. JOVANA CANAZA CAMARGO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Aprobada por el jurado revisor conformado por:

PRESIDENTE

:

Ing. M.Sc. Florentino V. CHOQUEHUANCA CÁCERES

PRIMER MIEMBRO

:

Ing. Mg.Sc. Eduardo Juan MANZANEDA CABALA

SEGUNDO MIEMBRO

:

Ing. M.Sc. Roger SEGURA PEÑA

DIRECTOR DE TESIS

:

Ing. M.Sc. Genny Isabel LUNA MERCADO

ASESOR DE TESIS

:

Dr. Wenceslao Teddy MEDINA ESPINOZA

PUNO – PERÚ
2012

Área: Ingeniería y tecnología

Tema: Propiedades físicas y estructurales

DEDICATORIA

A Dios, por darnos la oportunidad de vivir y por estar con nosotras en cada paso que damos, por fortalecer nuestros corazones e iluminar nuestra mente y por haber puesto en nuestros caminos a aquellas personas que han sido nuestros soportes y compañía durante todo el periodo de estudio.

A nuestros queridos padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que somos, en toda nuestra educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

A nuestros hermanos y hermanas, que siempre estuvieron allí apoyándonos, porque juntos hemos pasado momentos maravillosos, que han marcado y han dejado huellas en nuestros corazones; por todos esos bellos momentos y los no tan bellos, Gracias.

Finalmente a los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario y que nos ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra Alma Mater la Universidad Nacional del Altiplano, a la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por sus enormes aportes en nuestra formación profesional.

Al Ing. M.Sc. Genny Isabel Luna Mercado, por su comprensión y acertada dirección en la culminación del presente trabajo.

Al Dr. Wenceslao Medina Espinoza, Ing. M.Sc. Thomas Ancco Vizcarra por el asesoramiento en el trabajo de investigación.

A los Ingenieros M.Sc. Florentino Víctor Choquehuanca Cáceres, M.Sc. Eduardo Juan Manzaneda Cabala, y M.Sc. Roger Segura Peña, miembros del jurado por su acertada contribución en la culminación de nuestro trabajo.

A la Empresa “MAQUINARIAS DC E.I.R.L.”; dirigida por el Señor David Calla Paricahua, el agradecimiento infinito, quien nos apoyó desinteresadamente en el aporte de sus ideas y su valiosa experiencia en la construcción y en la culminación de nuestro equipo.

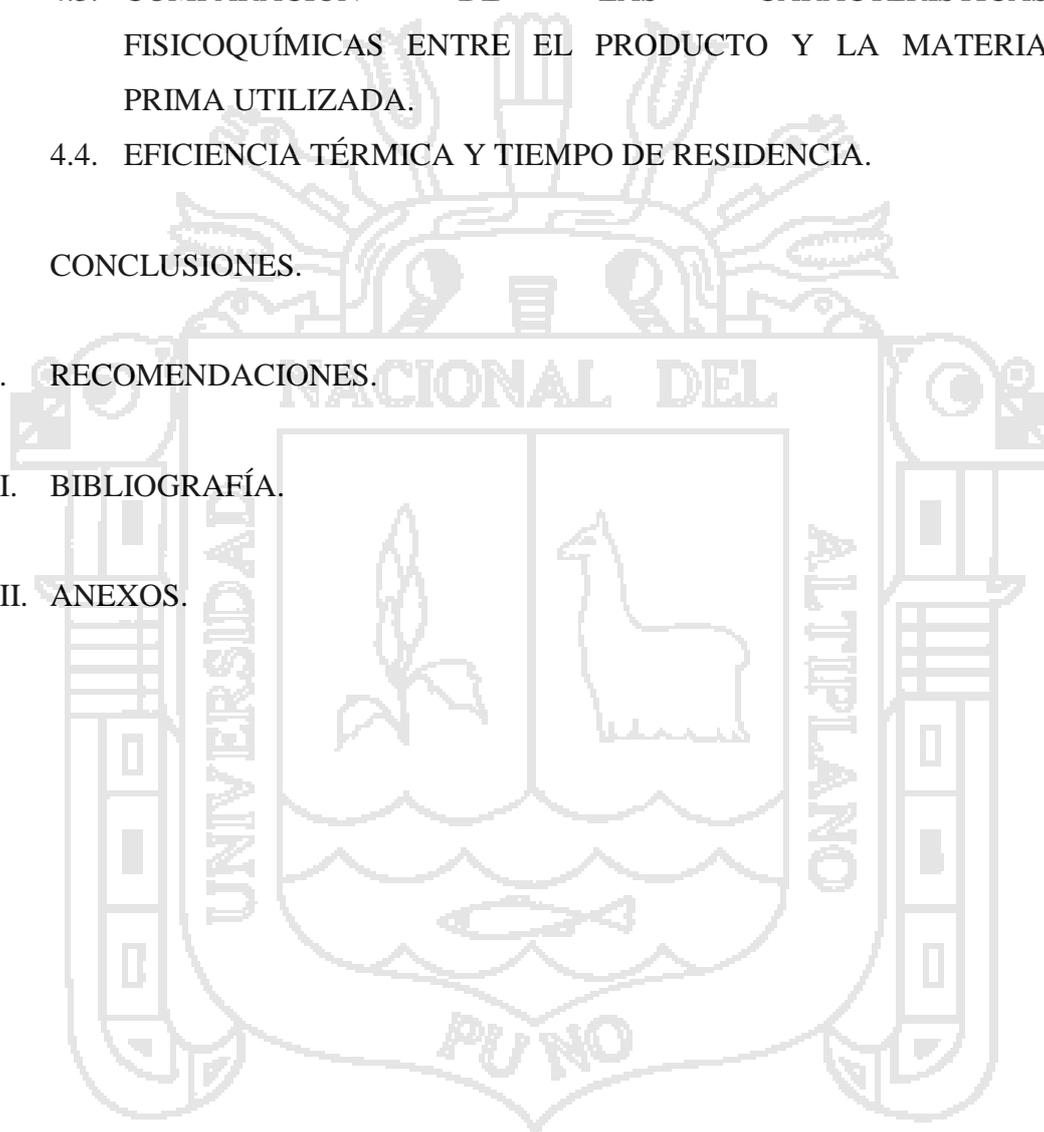
Agradecemos de forma especial a nuestros amigos y amigas de la universidad porque siempre nos dieron la mano en cada momento y nos alentaron de forma incondicional para la realización de este trabajo de investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.	1
I. INTRODUCCIÓN.	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.	3
2.1. DEFINICIÓN DEL PRODUCTO A SECAR.	3
2.1.1. La leche.	3
2.1.2. Leche en polvo.	4
2.2. SECADO.	5
2.2.1. Tipos de Secado.	6
2.3. SECADO POR ATOMIZACIÓN.	9
2.3.1. Etapas del secado por Atomización.	11
2.4. ELEMENTOS DE UN SECADOR POR ATOMIZACIÓN.	13
2.4.1. Sistema de Calentamiento del Aire.	14
2.4.2. Sistemas de Aspersión.	14
2.4.3. Cámara de Secado.	23
2.4.4. Descarga del producto seco de la cámara de secado.	28
2.4.5. Aplicaciones del secado por aspersión.	30
2.4.6. Selección del tipo de atomizador.	32
2.4.7. Sistema de alimentación.	34
2.4.8. Sistemas de recolección de sólidos.	35
2.5. EFECTOS DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN EN EL CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECADOR.	37
2.5.1. Efecto de la temperatura en la entrada.	37
2.5.2. Efecto del contenido de sólidos en el alimento.	38
2.5.3. Efecto de la diferencia de temperaturas.	39
2.5.4. Efecto de la humedad.	39
2.5.5. Efectos de la temperatura del alimento.	40
2.5.6. Principales variables del proceso de secado por atomización.	40

2.6.	DISEÑO DE UN SECADOR POR ATOMIZACIÓN.	42
2.6.1.	Balance de masa y energía.	42
2.6.2.	Ecuaciones de diseño para el dimensionamiento de la cámara de secado y equipos auxiliares.	44
2.6.3.	Funcionamiento del secador por atomización.	49
2.6.4.	Tiempo de Residencia Dentro de la Cámara de Secado.	50
2.7.	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.	51
2.7.1.	Aceros inoxidables y su clasificación.	51
2.7.2.	Procesos de unión.	53
2.7.3.	Aislación.	54
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.	56
3.1.	LUGAR DE EJECUCIÓN.	56
3.2.	MATERIA PRIMA.	56
3.3.	EQUIPOS DE CONTROL PARA LAS PRUEBAS DE SECADO.	56
3.4.	MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO POR ATOMIZACIÓN.	57
3.5.	EQUIPOS Y HERRAMIENTAS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR POR ATOMIZACIÓN.	58
3.6.	MÉTODO DE ANÁLISIS.	59
3.6.1.	Análisis fisicoquímico de la materia prima y producto final.	59
3.7.	MÉTODO DE ANÁLISIS DEL PRODUCTO FINAL.	60
3.7.1.	Tamaño de partícula (Granulometría).	60
3.8.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL EQUIPO.	61
3.8.1.	Construcción del equipo de secado por atomización a nivel de laboratorio.	61
3.8.2.	Evaluación de los parámetros de secado.	68
3.8.3.	Obtención de leche en polvo.	71
IV.	RESULTADOS Y DISCUCIONES.	73
4.1.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL EQUIPO.	73
4.1.1.	Cámara de secado.	73
4.1.2.	Equipos auxiliares.	74
4.1.3.	Instrumentación.	78

4.1.4.	Funcionamiento del equipo de secado.	80
4.2.	EVALUACIÓN DEL EQUIPO EN LA OBTENCIÓN DE LECHE EN POLVO.	81
4.2.1.	Evaluación de la materia prima.	81
4.2.2.	De la determinación de parámetros de secado.	81
4.2.3.	Evaluación del producto final.	85
4.3.	COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS ENTRE EL PRODUCTO Y LA MATERIA PRIMA UTILIZADA.	87
4.4.	EFICIENCIA TÉRMICA Y TIEMPO DE RESIDENCIA.	89
V.	CONCLUSIONES.	73
VI.	RECOMENDACIONES.	74
VII.	BIBLIOGRAFÍA.	75
VIII.	ANEXOS.	80



ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Composición nutricional de la leche fresca.	4
Cuadro 2. Tipos de Leche en polvo.	5
Cuadro 3. Intervalo de tamaño de partículas obtenidas en secadores por aspersion.	15
Cuadro 4. Efecto de las variables de proceso en las gotas para atomizadores neumáticos.	23
Cuadro 5. Ventajas y desventajas de las cámaras de base cónica y plana.	29
Cuadro 6. Productos obtenidos por secado spray.	32
Cuadro 7. Tamaño de partículas de productos en polvo (μm).	33
Cuadro 8. Efecto de la temperatura en la entrada en el calor específico consumido para un sistema integrado de flujo mezclado con secador spray fluidizado con boquilla atomizadora.	38
Cuadro 9. Efecto de los sólidos en el calor requerido para producir un (1) kilogramo de producto.	39
Cuadro 10. Efecto de la temperatura en la entrada en el calor específico consumido para un sistema integrado de flujo mezclado spray fluidizado con boquilla atomizadora.	39
Cuadro 11. Efecto de la humedad del ambiente en la capacidad de secado.	40
Cuadro 12. Influencia de las variables del secado por atomización.	41
Cuadro 13. Relación entre altura y diámetro para la cámara de secado.	45
Cuadro 14. Velocidad superficial en un Atomizador con disco rotatorio.	46
Cuadro 15. Eficiencias térmicas en operaciones típicas de secado por aspersion que comprenden diferentes diseños de cámaras.	50
Cuadro 16. Comparación de temperaturas máximas de empleo de distintos materiales aislantes.	55
Cuadro 17. Resumen de metodología de Diseño del equipo de secado.	61
Cuadro 18. Características fisicoquímicas de la Materia Prima (leche entera en polvo).	81
Cuadro 19. Análisis de varianza para el contenido de humedad.	82
Cuadro 20. Análisis de varianza para el contenido de rendimiento de proceso.	83
Cuadro 21. Prueba de rango múltiple de Tukey para temperatura de alimentación.	84
Cuadro 22. Prueba de rango múltiple de Tukey para concentración.	84

Cuadro 23.	Prueba de rango múltiple de Tukey para temperatura de alimentación.	85
Cuadro 24.	Prueba de rango múltiple de Tukey para concentración.	85
Cuadro 25.	Características fisicoquímicas de la leche entera en polvo a diferentes concentraciones.	85
Cuadro 26.	Análisis granulométrico de distribución de partículas por tamaño.	86
Cuadro 27.	Comparación de características fisicoquímicas de la materia prima y el producto final.	87



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Vaporización de las gotas atomizadas, en contacto con el aire caliente dentro de la cámara de secado por atomización.	10
Figura 2. Etapas del secado por aspersión.	11
Figura 3. Atomizador de disco centrífugo.	16
Figura 4. Atomizador de Toberas de alta presión.	18
Figura 5. Tobera neumática de mezcla externa.	19
Figura 6. Representación de atomizadores neumáticos.	21
Figura 7. Cámara de secado flujo en co-corriente.	24
Figura 8. Cámara de secado con flujo en contracorriente.	25
Figura 9. Cámara de secado con flujo mezclado.	26
Figura 10. Tipos de dispersores de aire de flujo rotacional alrededor del atomizador.	27
Figura 11. Bases para descarga inicial de producto.	28
Figura 12. Diseños combinados de cámaras de secado.	30
Figura 13. Esquemas de ciclones convencionales.	36
Figura 14. Esquema de balance de materia y energía.	42
Figura 15. Balanza determinadora de Humedad.	59
Figura 16. Equipo de Tamizado.	60
Figura 17. Diseño del equipo en 3D.	63
Figura 18. Sistema de control adoptado para el equipo de secado por atomización con tobera neumática.	67
Figura 19. Diagrama Experimental de Operaciones.	70
Figura 20. Diagrama de flujo del proceso de obtención de leche en polvo para la evaluación del equipo.	71
Figura 21. Cámara de secado.	74
Figura 22. Calefactor de aire.	75
Figura 23. Tobera de Atomización.	76
Figura 24. Ciclón separador de polvo.	76
Figura 25. Ventilador-Extractor.	77
Figura 26. Tubería de transporte.	78
Figura 27. Equipo de secado por atomización.	79
Figura 28. Distribución de tamaño de partícula del producto en polvo.	86

ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Resultados estadísticos.	80
Anexo 2. Aspecto económico.	82
Anexo 3. Cálculo de la composición del aire húmedo.	86
Anexo 4. Cálculo diseño del la cámara de secado y equipos auxiliares del secador por atomización a nivel de laboratorio.	88
Anexo 5. Cálculos de eficiencia térmica y tiempo de residencia en el equipo.	105
Anexo 6. Nomenclatura.	107
Anexo 7. Manual de uso y mantenimiento del equipo de secado por atomización.	109
Anexo 8. Certificado de análisis fisicoquímicos de la materia prima y producto final.	114
Anexo 9. Galería de fotografías.	115
Anexo 10. Planos elaborados en el programa Autocad.	120



RESUMEN

El presente trabajo de investigación denominado, “Construcción de un secador por atomización a nivel de laboratorio y su evaluación en la obtención de leche en polvo”, tuvo por objetivos Construir un secador por atomización a nivel de laboratorio y describir sus características técnicas de funcionamiento, determinar la humedad del producto y rendimiento del proceso obtenidos en el secador por atomizador a concentración y temperatura de alimentación, (con niveles $CA_1:25\%$, $CA_2:30\%$, $CA_3:35\%$ y $TA_1:20^\circ C$, $TA_2:30^\circ C$), y determinar las características físico-químicas del producto obtenido. La primera etapa, consistió en construir y ensamblar el equipo. Esta operación se llevó a cabo en la Empresa Industrial “Maquinarias DC”, en la ciudad de Juliaca y la segunda etapa fue la evaluación del equipo con la obtención de leche en polvo, que se realizó en la Universidad Nacional del Altiplano Puno en la planta piloto de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial. El secador diseñado y construido, está constituido por una cámara de secado de forma cilíndrica y base cónica con un diámetro (interno) de $0.5\ m$ y una altura de $1.7\ m$ recubierto con un aislante de $4\ cm$ de espesor para evitar las pérdidas de calor. En la parte superior (tapa cilíndrica) lleva el calefactor de aire, el dispositivo atomizador y un dispersor de aire. Así mismo, cuenta con los equipos auxiliares: Calefactor de aire con entrada de forma tangencial (ubicada en la tapa cilíndrica), Ciclón separador de polvo, Sistema de atomización (tobera de dos fluidos) y un Extractor de aire. La instrumentación del secador está dispuesta en un tablero de control donde se visualizan: las temperaturas de entrada y salida del aire, control de calefactor de aire, control del extractor de aire, y la presión de atomización, que se maneja fuera del tablero; estos permiten observar y controlar las diferentes condiciones de operación durante el proceso de secado. Se evaluó el equipo en función a sus parámetros de diseño obteniéndose una eficiencia global, evaporativa y térmica de 70, 77 y 89% con un tiempo de residencia de 5.2 a 7 s el cual, es mayor al tiempo de secado propuesto (4 s). Para la evaluación del equipo en la obtención de leche en polvo, se observó que a mayores concentraciones y temperatura de alimentación, se logran obtener mejores resultados de leche en polvo con un mínimo de 4.68% de humedad y un máximo rendimiento de proceso de 78.82% sin embargo, reduce su facilidad de atomización ante un aumento en su viscosidad; resultando así mejores los tratamientos con $CA=25\%$ y $TA=30^\circ C$ para las condiciones de proceso de secado en el equipo. De la comparación de las características físico químicas (ambos en base seca), de la materia prima utilizada y el producto obtenido en el secador a

C=25% y TA=30°C (con: proteína 24.36%, grasa 27.32% y carbohidratos 45.86%), no se observó diferencia significativa entre las propiedades fisicoquímicas del producto y la materia prima. Por consiguiente; se determinó que los tratamientos a CA=25% y TA=30°C resultan ser mejores en cuanto a su facilidad de atomización, condiciones de secado en el equipo y contenido fisicoquímico del producto.



I. INTRODUCCIÓN.

Uno de los problemas principales en el secado de alimentos, es el riesgo de alteración de la calidad nutritiva y calidad organoléptica del producto tratado. Para esto, se puede eliminar la pérdida de aromas y componentes termolábiles, escogiendo técnicas que emplean temperaturas bajas (liofilización, crio concentración); o, con tiempos cortos de tratamiento (atomización).

Por la facilidad de manipuleo y consumo (tanto el mercado local, nacional e internacional) exigen que los extractos naturales sean deshidratados, utilizando técnicas modernas de secado; que garantice, que el producto sea de buena calidad, exento de riesgos de contaminación y degradación. Los tipos de secado más usados, son los que presentan alta eficiencia por tener grandes ventajas como: Tiempo de secado mínimo y por los altos coeficientes de transferencia de masa y calor, que permiten que el producto a secar no se degrade y sea aplicable para el secado de diferentes productos según conveniencia para casos especiales (líquidos).

El proceso de secado por “Spray”, también conocido por atomización, consiste en pulverizar una solución líquida expuesta a una corriente de aire caliente no saturada que deberá remover su humedad, permitiendo que el soluto que se encuentra diluido en la solución sea obtenida en forma de polvo. Actualmente este proceso tiene asociación directa o indirecta con un gran número de productos que son consumidos en la vida diaria. El secado por atomización es largamente utilizada en las industrias alimenticias, farmacéuticas y metalúrgicas.

El desenvolvimiento de la tecnología de secado por atomización en la industria tiene inicio en la década 20 del siglo pasado; desde entonces soluciones, suspensiones, productos abrasivos o no, y materiales sensibles o resistentes al calor son usualmente producidos en secadores por atomización (Mermelstein, 2001).

Esta técnica de secado es poco conocida y difundida en nuestro ámbito local, además a nivel nacional son muy pocas las empresas y universidades que cuentan con estos equipos, ya sea para realizar sus propios trabajos u ofrecer sus servicios. La falta de un equipo de secado por atomización en la UNA-Puno (principalmente por su costo), hace que no se

puedan desarrollar e investigar nuevas tecnologías en la conservación de productos, sobre todo de la Región Puno, que posee una gran cantidad de recursos naturales (Leche, café, achiote, yacon, maca, quinua, frutas, y otros), que contienen extractos naturales (colorantes y medicinales), muchos de los cuales son extraídos en forma de solución líquida y requieren ser transformados como producto sólidos para su posterior utilización y que no son debidamente aprovechados o explotados.

La consideración de estos aspectos es de gran importancia, pues se pretende estimular el diseño y construcción de equipo, y el desarrollo de trabajos de investigación relacionados a la concentración de soluciones y su secado por atomización, con lo que se estaría ayudando a promover la industria y tecnología en la Región Puno y hacer posible inversiones menos caras, con el propósito de ofrecer un equipo de mucho menor costo que el de equipos de las Marcas conocidas tales como el GEA Niro atomizer, Harry Mazal Modelo 2001 y Buchi Modelo B - 290. Las cuales aumentarían y crearían nuevas fuentes de trabajo.

Como objetivos específicos, fueron:

- Construir un secador por atomización a nivel de laboratorio y describir sus características técnicas de funcionamiento.
- Determinar la humedad del producto y rendimiento del proceso obtenidos en el secador por atomización.
- Determinar las características físico-químicas del producto obtenido.

II. REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1. DEFINICIÓN DEL PRODUCTO A SECAR.

Para el diseño del equipo de secado se requieren definir el producto a usar para el proceso de secado, se ha establecido la leche como el producto de alimentación. Cabe señalar que el equipo también puede secar otros productos como café y extractos naturales (medicinales, colorantes, etc.).

2.1.1. La leche.

Se entiende por leche natural el producto íntegro, no alterado ni adulterado y sin calostros, del ordeño higiénico, regular, completo e ininterrumpido de las hembras mamíferas, domésticas, sanas y bien alimentadas (Madrid, 1996).

a. Características.

Desde el punto de vista fisicoquímico, la leche es una mezcla homogénea de un gran número de sustancias (lactosa, glicéridos, proteínas, sales, vitaminas, enzimas, etc.) que están unidas en emulsión (la grasa y sustancias asociadas), algunas en suspensión (las caseínas ligadas a las sales minerales) y otras en disolución verdadera (lactosa, vitaminas hidrosolubles, proteínas del suero, sales, etc.). La grasa que es el componente que más varía entre razas, es inversamente proporcional a la cantidad de leche producida.

b. Composición de la Leche.

La leche es uno de los alimentos más completos y equilibrado para el hombre en sus primeros meses de vida y a su vez excelente para cualquier edad.

En el **Cuadro 1**, se muestra la composición porcentual de proteínas, grasas, hidratos, sales minerales y humedad. En dicho cuadro se indican los límites entre los que pueden variar los porcentajes de los distintos componentes, que dependen de muchos factores:

- Raza de la vaca;
- Tipo de alimentación;
- Estado sanitario del animal; y,
- Época del año, etc.

Cuadro 1. Composición nutricional de la leche fresca.

Composición de la leche fresca	
	%
Proteínas	2.8 - 4.9
Grasa	2.6 - 4.8
Hidratos de carbono	3.7 - 5.4
Sales minerales	0.6 - 1.0
Agua	85.6 - 89.5

FUENTE: (MADRID, 1996).

2.1.2. Leche en polvo.

La leche en polvo es aquella en la que se elimina la mayor parte de su agua de constitución, dejando un máximo del 5%, correspondiendo el restante 95% a las proteínas, lactosa, grasa, sales minerales, etc. (Madrid, 1996).

Se distinguen dos tipos de leche en polvo desde el punto de vista comercial:

- Leche en polvo entera, con un mínimo de 26% de materia grasa en peso; y,
- Leche en polvo desnatada, con un máximo del 1.5% de grasa en peso.

a. Características.

- Color uniforme, blanco o cremoso claro, carente de color amarillento o pardo, característicos de un producto recalentado;
- Olor y sabor fresco y puro, antes y después de su reconstitución.
- Humedad, máximo 5% en peso; y,
- Índice de solubilidad: para la leche entera, un mililitro como máximo. Para la leche desnatada, 1.25 ml como máximo (Madrid, 1996).

b. Composición.

Según las normas del CODEX STANDAR 207-1999 alimentario para las leches en polvo destinadas a consumo directo o elaboración ulterior se tiene: (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Tipos de Leche en polvo.

Leche entera en polvo	
Materia grasa de la leche	Mínimo 26% y menos del 42% <i>m/m</i>
Contenido máximo de agua **	5% <i>m/m</i>
Contenido mínimo de proteínas de la leche en el extracto seco magro de la leche **	34% <i>m/m</i>
Leche en polvo parcialmente desnatada (descremada)	
Materia grasa de la leche	Más del 1.5% y menos del 26% <i>m/m</i>
Contenido máximo de agua **	5% <i>m/m</i>
Contenido mínimo de proteínas de la leche en el extracto seco magro de la leche **	34% <i>m/m</i>
Leche en polvo desnatada (descremada)	
Contenido máximo de materia grasa de la leche	1.5% <i>m/m</i>
Contenido máximo de agua **	5% <i>m/m</i>
Contenido mínimo de proteínas de la leche en el extracto seco magro de la leche **	34% <i>m/m</i>

** El contenido de agua no incluye el agua de cristalización de la lactosa; el contenido de extracto seco magro incluye el agua de cristalización de la lactosa.

FUENTE: CODEX STAN 207 (1999).

2.2. SECADO.

El secado significa remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de un cierto material, el agua se elimina en forma de vapor con aire; así mismo se usa como técnica de preservación ya que los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua; así como también muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en los alimentos (Geankoplis, 1998).

El desecado se desarrolla por difusión de vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire hasta el medio que lo rodea. El movimiento de la humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápido para mantener una condición saturada en la superficie, y la velocidad de desecación se controla por medio de la velocidad de transmisión de calor, a la superficie de evaporación. La

velocidad de transferencia de masas se equilibra con la velocidad de transmisión de calor, y la temperatura de la superficie saturada permanece constante (Perry, 1980).

El proceso de secado de sólidos es de gran importancia práctica y económica en todas las industrias de procesos. El tiempo de operación varía según el material a secar, desde unos pocos segundos a algunos días (Treybal, 1993).

En la práctica, la energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor. A veces se usan otras formas de energía como campos de radio frecuencia, trabajo mecánico o reacciones químicas (Nonhebel & Moss, 1979).

2.2.1. Tipos de Secado.

Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente en:

- Secado por Lotes o discontinuos; y,
- Secado Continuo.

a. Secado por Lotes o discontinuos.

Este tipo de secaderos se utiliza cuando la operación de secado es para poco material o es estacional, o cuando se secan diferentes tipos de materiales (Barbosa & Vega, 2000).

Generalmente, es un proceso en donde cierta cantidad de sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye continuamente, en la cual se evapora la humedad. Se opera intermitente o cíclicamente en condiciones de estado no estacionario: la sustancia se carga al equipo de secado y permanece en él hasta que se seca; entonces el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote (Treybal, 1993).

El secado por lotes es una operación relativamente cara, en consecuencia, se limita a operaciones a pequeña escala, a planta piloto y a trabajos de investigación, y para secar materiales valiosos cuyo costo total será poco alterado por el costo agregado en la operación de secado. Puede utilizarse el secado directo o indirecto (Treybal, 1993).

b. Secado Continuo.

En este tipo de secado, tanto la sustancia que se va a secar, como el gas pasan continuamente a través del equipo. Generalmente, no se utilizan métodos normales por etapas; en todas las operaciones ocurre el contacto continuo con el gas y la sustancia que se seca. Generalmente se operan en estado estacionario.

El secado continuo ofrece las ventajas siguientes: generalmente el equipo necesario es pequeño en comparación con la cantidad de producto, la operación se integra fácilmente con la fabricación química continua, sin necesidad de mantenimiento intermedio; el producto tiene un contenido más uniforme de humedad, y el costo de secado por unidad de producto es relativamente pequeño. Como en el secado por lotes, la naturaleza del equipo que se utiliza depende bastante del tipo de material que se va a secar. Pueden utilizarse el secado directo o indirecto y algunas veces los dos (Treybal, 1993).

Como se mencionó en líneas anteriores en ambos métodos pueden utilizarse el secado directo o indirecto, para un mejor entendimiento se definirán los métodos de operación.

a. Secado Directo.

Es el secado en el cual el material a secar se pone en contacto con gas caliente (casi siempre aire), el cual pasa sobre o a través del material. El calor fluye al producto principalmente por convección. Rodeado por aire caliente, cada partícula es calentada de forma uniforme (presenta una gran eficiencia térmica), mejor que en el secado indirecto. Además, el calentamiento es mejor si los sólidos son porosos, porque el gas caliente entra y sale como vapor, el cual es casi siempre vapor de agua. Cuando el flujo del material a secar y el flujo del aire es paralelo (el modo más común), el sólido y su agua ligada normalmente quedan por debajo del punto de ebullición del agua.

Esto es porque la presión de aire y vapor de agua se combinan para formar la presión total, con el vapor que contribuye en menor parte. Así el agua se evapora a baja presión y temperatura, aún si el aire está bastante caliente. Éste retiene los sólidos relativamente fríos tanto como retienen algo de humedad.

Para posteriores aplicaciones el producto es descargado en un nivel de temperatura entre la temperatura de evaporación-enfriamiento y del aire de salida (Treybal, 1993).

b. Secado Indirecto.

Es más simple que el secado directo en teoría y aplicación en sistemas de equipos. Es grandemente practicado, pero recibe menos investigación y atención pública. Su operación básica es conducir el calor dentro de partículas por las paredes calientes de los envases y agitadores que lo contienen. Las partículas son calentadas lentamente porque la conducción es retardada en sólidos por su porosidad. La radiación actúa en menor parte. Probablemente la condensación de algo de vapor fuera o dentro de las partículas frías es de más importancia.

El secado es más rápido y uniforme cuando se le agita dando enfriamiento. Las partículas húmedas entran en contacto con la superficie caliente. La temperatura de la superficie puede ser aproximada a la del sólido; al suministrar una temperatura induciendo fuerza, puede aproximarse a la vez al punto de ebullición asegurando la evaporación. Para evitar daños al producto por el calor, es necesario el uso de aire u operación al vacío (Cook & DuMont, 1991).

Los materiales sólidos húmedos se pueden clasificar en las siguientes categorías (Nonhebel & Moss, 1979).

- Pastas y sedimentos como las provenientes de filtros y centrifugas;
- Cristales (tanto orgánicos como inorgánicos) y gránulos (comúnmente mezclas) generalmente mayores a 1 mm;
- Sólidos porosos, como trozos de goma sintética;
- Polvos que fluyen bien, aun mojados, generalmente de tamaño menor de 200 μm (micrones), y que producen gran cantidad de polvo cuando están secos, como por ejemplo pigmentos;
- Suspensiones que requieren ser secadas sin separación previa de sólido húmedo; y,
- Líquidos, como extractos, emulsiones y algunas soluciones concentradas.

Los objetivos principales que suelen perseguir las operaciones de secado son: (Marcilla, 1998).

- Facilitar un proceso industrial posterior;
- Reducir costos de transporte;
- Permitir la utilización satisfactoria, final o intermedia de un determinado producto;
- Permite la conservación, almacenamiento y transporte de un producto;
- Mejorar el rendimiento de una instalación o un equipo; y,
- Mejorar la apariencia exterior y valor comercial del producto.

Si un material a procesar contiene una cantidad considerable de humedad superficial libre, que puede ser rápidamente reducido por medios mecánicos tales como: filtración, prensado, centrifugación, etc., deberán considerarse dichos medios de remoción de humedad en primer término, por ser más económicos.

2.3. SECADO POR ATOMIZACIÓN.

El secado por atomización es la transformación de una alimentación de partículas en fase líquida a partículas secas por medio de la aspersión en un medio caliente, la alimentación puede ser en solución, suspensión o pasta, y el producto final es polvo, granulo o aglomerado, el cual depende de las propiedades químicas y físicas de la alimentación, así como del diseño y operación de la torre. El secado por atomización, involucra la atomización del alimento en forma de spray, del contacto entre este alimento y el aire caliente que circula en co-corriente resulta una evaporación instantánea de humedad (Perry, 1996).

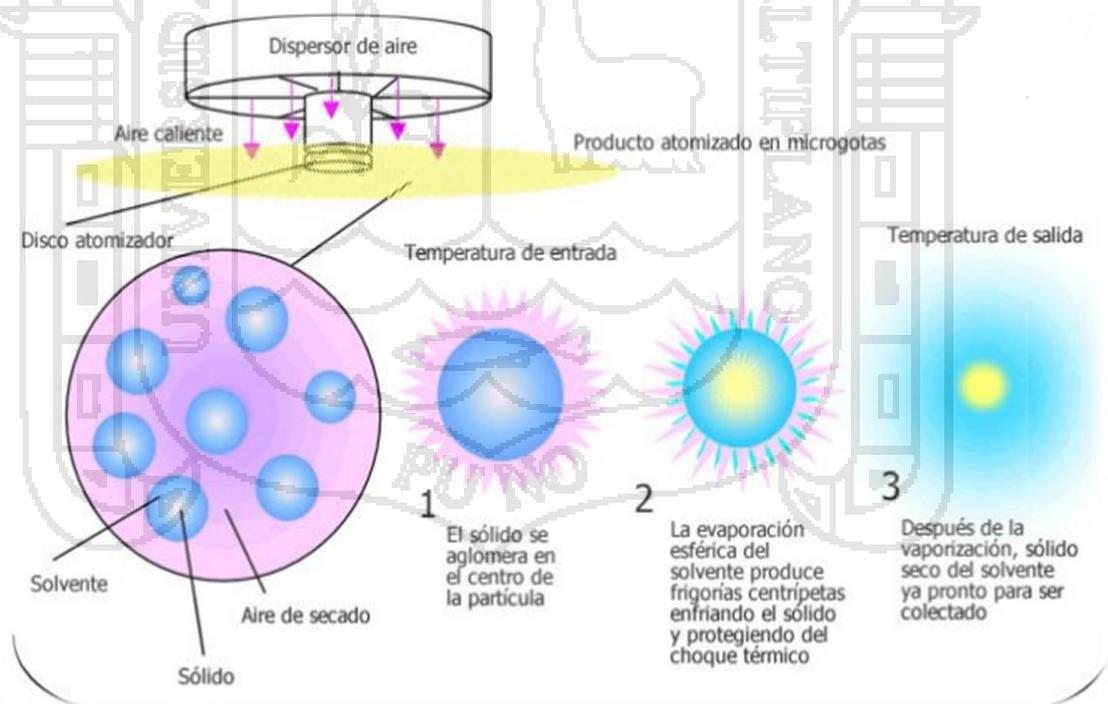
En este tipo de secado el producto, previamente concentrado, es atomizado en forma de pequeñas gotitas (10 a 200 μm de diámetro), en una masa de aire caliente en movimiento (150 a 300 °C), en el interior de una cámara de deshidratación de gran volumen. El flujo de producto a la entrada se controla de forma que la temperatura de aire a la salida sea de 90 a 100 °C. Esta temperatura corresponde a una temperatura de bulbo húmedo (y temperatura del producto) de 40 a 50 °C. Para el correcto

funcionamiento del proceso es preciso que la atomización sea completa y uniforme (Fellows, 1993).

La homogeneidad de la atomización y los altos rangos de humedad evaporada, permiten que la temperatura del producto seco sea considerablemente más baja que la del aire de secado saliendo del secador. De este modo el producto no está sujeto a altas temperaturas y cuando es separado del aire de secado está libre de cualquier calor que pueda degradarlo (Masters, 1985).

La operación de secado por aspersión consiste en la transformación de una alimentación en estado líquido a un producto sólido y seco, al poner en contacto dicha alimentación en forma de gotas finas con una corriente de aire caliente (Figura 1). El tiempo de contacto es muy corto y en consecuencia el daño debido al calor también es mínimo (Masters, 1985).

Figura 1. Vaporización de las gotas atomizadas, en contacto con el aire caliente dentro de la cámara de secado por atomización.



Según el tamaño de la cámara de secado, las etapas 1, 2 y 3 se completan en apenas 4 segundos.

FUENTE: (SPRAY PROCESS, 2012).

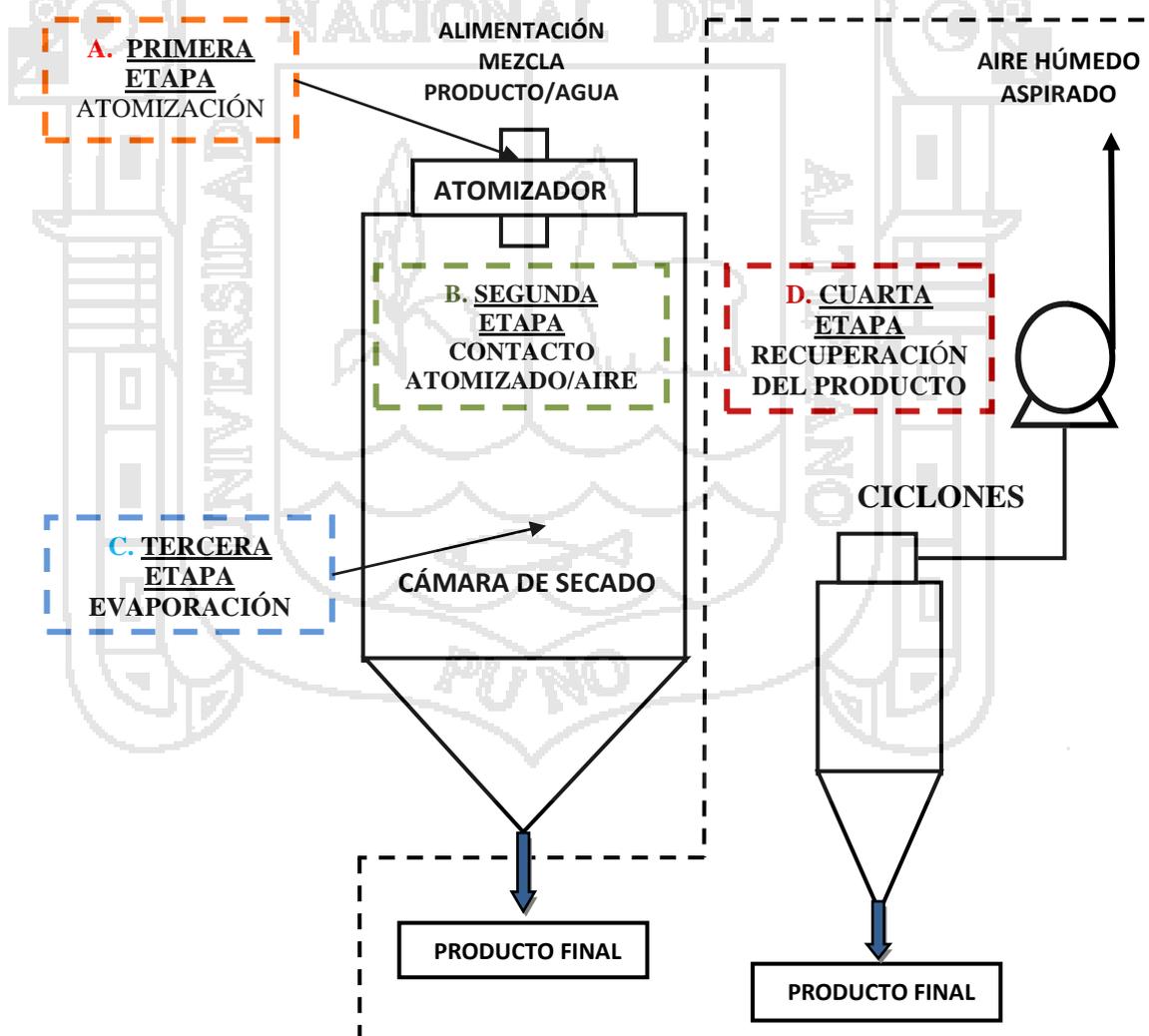
2.3.1. Etapas del secado por Atomización.

El secado por aspersion consiste en cuatro etapas (**Figura 2**) (Masters, 1991).

- Atomización (de la mezcla producto/agua en el secador por aspersion).
- Contacto de aire-gota (mezcla del atomizado y del medio de secado).
- Evaporación.
- Recuperación del producto seco del aire.

Cada etapa se lleva a cabo de acuerdo al diseño y operación del secador, y, junto con las propiedades físicas y químicas de la mezcla producto/agua determinan las características del producto secado.

Figura 2. Etapas del secado por aspersion.



A) Atomización, B) Contacto aire-gota, C) Evaporación, D) Recuperación del producto seco.
FUENTE: (MENDOZA, *et al*, 2003)

2.3.2. Ventajas y Desventajas del secado por Atomización.

Ventajas:

- La calidad y las propiedades del producto son controladas de forma eficiente, (Nonhebel & Moss, 1979);
- Alimentos sensibles al calor, productos biológicos y farmacéuticos pueden ser secados a presiones atmosféricas y a bajas temperaturas. A veces se utiliza un medio inerte (nitrógeno);
- Como los tiempos de secado son muy cortos (de 2 a 30 s), muchos materiales termo sensibles pueden secarse satisfactoriamente quedando listos para envasar;
- En este secado el material no está en contacto con las paredes del equipo hasta que está seco y además, las paredes se encuentran aproximadamente a la temperatura del aire de salida, por lo tanto se reducen los problemas de adherencia y corrosión en el equipo, (Geankoplis, 1998);
- El producto es obtenido como un polvo fluido finamente dividido y en forma fácilmente soluble en un disolvente apropiado;
- El tamaño de partículas de algunos productos es ajustable dentro de ciertos límites, variando las condiciones de atomización, (Nonhebel & Moss, 1979);
- El proceso es adecuado para el secado continuo de cantidades relativamente grandes de material; y,
- Puesto que la temperatura de operación del gas puede extenderse de 150 a 600° C, la eficiencia es comparable a la de otros tipos de secadores directos.

Desventajas:

- El calor requerido por unidad de peso del producto es alto, pues el contenido de la humedad en la alimentación puede ser grande comparado con la mayoría de otros secadores. Además, el rendimiento térmico es bajo, debido a las restricciones en la temperatura de entrada y a la temperatura relativamente alta del aire a la salida, (Geankoplis, 1998);
- En algunos casos, la baja densidad aparente del producto puede ser una desventaja (sin embargo el secado por atomización no produce necesariamente un producto con baja densidad aparente y no se debe suponer que en todos los casos ocurre así). La densidad global del sólido seco, una propiedad de especial importancia para el envasado de los productos, es a menudo difícil de mantener

constante porque puede ser muy sensible a los cambios del contenido de sólido, a la alimentación, a la temperatura del gas de entrada y otras variables, (Geankoplis, 1998);

- El costo del equipo es alto respecto al tonelaje anual del producto secado, particularmente en el caso de equipo de pequeña capacidad, (Nonhebel & Moss, 1979);
- El equipo requiere mucho espacio;
- No se puede utilizar el secador por atomización con productos tóxicos, a menos que se tomen precauciones especiales;
- La recuperación en los gases de salida de productos que forman polvo puede ser problemática o puede necesitar de un equipo auxiliar costoso, (Mulvaney, *et al*, 2003);
- Todas las impurezas de la alimentación quedan retenidas en el producto, (Fellows, 1993);
- Desde el punto de vista exclusivo del secado, los secadores por atomización no son muy eficaces, pues se pierde mucho calor en los gases de escape, (Nonhebel & Moss, 1979); y,
- En este equipo, el material a secar tiende a pegarse en las paredes.

2.4. ELEMENTOS DE UN SECADOR POR ATOMIZACIÓN.

Básicamente un sistema de atomización tiene cinco elementos esenciales (Ibarz, *et al*, 2000).

- Sistema de calentamiento del aire;
- Una cámara de secado;
- Un dispositivo para dispersar el material que se va a secar;
- Una bomba para impulsar el líquido hacia la cámara de secado; y,
- Un sistema de recolección de las partículas secas en el seno del aire.

2.4.1. Sistema de Calentamiento del Aire.

El aire de secado puede ser calentado de diferentes formas (Westergaar, 2004).

- Indirectamente: Vapor, fuel, gas o aceite, Fluido térmico; y,
- Directamente: Gas o electricidad.

Calentamiento por vapor: Es un radiador simple. La temperatura que se puede obtener depende de la presión de vapor disponible. En condiciones normales es posible obtener una temperatura del aire 10 °C más baja que la correspondiente entalpia de saturación de vapor. El tamaño del calentador depende de las propiedades para transferir el calor a los tubos y las aletas y están normalmente alrededor de 50 $Kcal/°C*altura*m^2$ para una velocidad de 5 m/s, su eficiencia normalmente es de 98 a 99% (Westergaar, 2004).

Calentadores a base de aceite o gas: tienen flujos separados de aire de secado y gases de combustión, debido a que las partículas que se formen en el proceso de combustión pueden contaminar el alimento. Los calentadores de este tipo tendrán una eficiencia de unos 85% en la zona de 175 a 250 °C (Westergaar, 2004).

Calentadores a base de gas (directos): se utilizan solamente si se puede permitir que el gas de combustión este en contacto con el producto. Este tipo de calentador es barato, tiene alta eficiencia y la temperatura que se puede obtener es de unos 2000 °C (Westergaar, 2004).

Calentadores de aire eléctricos: son comunes en secadores para laboratorio y planta piloto. La inversión es baja, pero su operación es costosa. Son equipos pequeños y menos pesados que los tradicionales equipos de transferencia de calor tales como el de coraza y tubo y los de llama directa (Tiras, 1999).

2.4.2. Sistemas de Aspersión.

La atomización es la operación de la formación de una lluvia de una solución (llamado también el producto de partida), que tenga gotas uniformes de las dimensiones deseadas y la distribución de ésta lluvia a través del aire caliente es de la mayor importancia para obtener un secado por atomización satisfactoria (Oakley, 1997).

Tiene como objetivo crear la máxima superficie posible de la cual tendrá lugar la evaporación. Cuando más pequeñas sean las gotas, mayor la superficie y más fácil la evaporación y consecuentemente una mejor eficiencia térmica. Con respecto al secado, lo ideal sería que todas las gotitas atomizadas fueran de un tamaño uniforme, lo cual significaría que el tiempo de secado sería el mismo para todas ellas. Sin embargo, todavía no se ha logrado diseñar un atomizador que produzca una pulverización completamente homogénea (Perry, 1980).

Los parámetros que se deben tener en cuenta al realizar la atomización son: (Oakley, 1997).

- La distribución de los tamaños de las partículas (gotas), deben ser uniformes dentro de la cámara de secado;
- Propiedades físicas de la solución a atomizar (viscosidad, densidad);
- Dirección del gas entrante y de su temperatura (flujo paralelo, en contracorriente o mixto);
- Contenido de sólidos de la alimentación y de su temperatura.
- Humedad final requerida;
- Velocidad del disco o la presión de la boquilla; y,
- Intensidad de la alimentación.

Los intervalos típicos de tamaños de partículas obtenidos en secadores por aspersion se muestran en el **Cuadro 3**.

Cuadro 3. Intervalo de tamaño de partículas obtenidas en secadores por aspersion.

Atomizador	Tamaño de partícula (μm)
Discos rotatorios	1 - 600
Boquillas de presión	10 - 800
Boquillas neumáticas	5 - 300

FUENTE: (FILKOVÁ & MUJUMDAR, 1985).

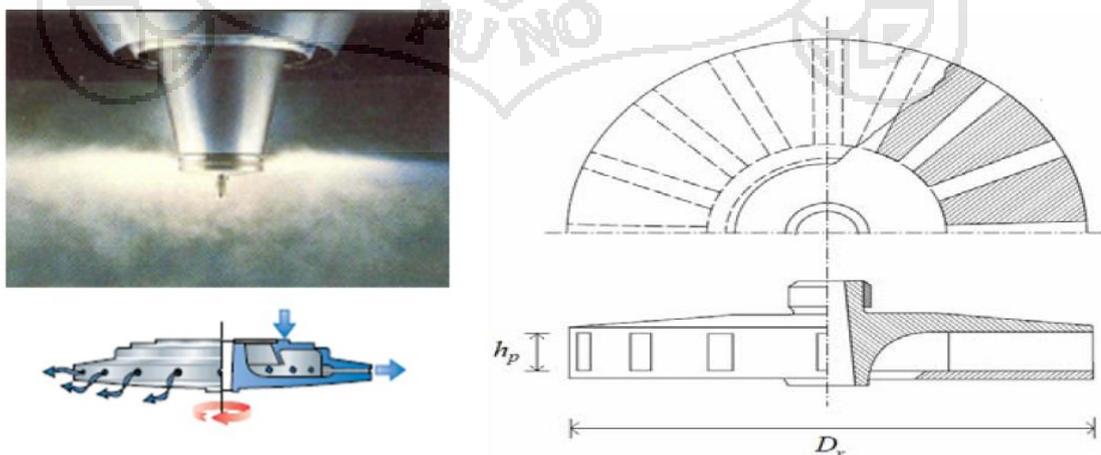
La atomización se realiza por medio de algunos de dispositivos atomizadores existentes. Los principales son: (Oakley, 1997).

- Discos centrífugos o rotativos de alta velocidad;
- Boquillas o toberas de alta presión; y,
- Neumáticas o toberas de dos fluidos.

a. Disco centrífugo.

La **Figura 3**, ilustra los principios de operación del disco centrífugo. El líquido a ser atomizado se alimenta, sobre un disco rotatorio que gira rápidamente. El líquido es acelerado hacia el exterior por la fuerza centrífuga que echa el líquido como una lámina delgada, la cual es seguidamente dispersada en gotas. La velocidad periférica del disco puede ser 200 m/s o más. Los orificios y espacios libres a lo largo de la trayectoria del flujo de fluido son grandes. Esto hace que se requiera bajas presiones de alimentación y virtualmente que el atomizador no se obstruya. Los discos centrífugos son flexibles para efectos de distribución de tamaño de partículas. Sus diseños son aprovechados para tamaños mayores a la escala piloto, por encima de las 200 toneladas métricas por hora. Este tipo de secador por atomización favorece la producción de partículas de tamaño medio y pequeño (30 - 150 μm), el dispositivo de atomización es muy sofisticado, de alta velocidad rotacional y cara comparado con los otros tipos de atomizadores. Pero es adecuado para soluciones viscosas, lo que permite elegirlo como primera opción para muchas aplicaciones de secado por atomización, (Oakley, 1997).

Figura 3. Atomizador de disco centrífugo.



FUENTE: (BYLUND, 1995) Y (FILKOVÁ *et al.*, 2006)

A continuación se mencionan las ventajas y desventajas del atomizador centrífugo (Filková, *et al.*, 2006).

Ventajas:

- Puede manejar altas velocidades de alimentación;
- Recomendado para materiales abrasivos;
- Despreciable tendencia a la obstrucción; y,
- El control del tamaño de la gota se realiza al cambiar la velocidad angular del atomizador.

Desventajas:

- Alto consumo de energía en comparación con las boquillas de presión;
- Alto costo de capital en comparación con las boquillas de presión; y,
- Requiere cámaras de secado con diámetros grandes.

b. Toberas de alta presión.

En este tipo de secador, la atomización se consigue haciendo pasar la solución a presión por una o más toberas ubicadas en las proximidades del techo de la cámara de secado. La energía requerida para atomizar la solución es mediante bombas especiales de alta presión. La tobera a presión es un dispositivo mucho más pequeño que el disco centrífugo. El líquido introducido dentro de la tobera es removido por una entrada tangencial o por ranuras de inserción. La presión es suficiente para forzar al líquido a salir fuera del orificio en una lámina delgada, la cual es seguidamente expulsada como un cono hueco de líquido que se rompe en gotas. Las toberas a presión tienen orificios pequeños y no son recomendables para líquidos viscosos como los discos centrífugos, estos dispositivos son muy susceptibles al desgaste y requieren bombas de alta presión (en lo posible 100 *bar*). La abrasión puede también ser un problema, ciertas partes de esta tobera podría necesitar reemplazos regulares (Oakley, 1997).

La boquilla a presión de un fluido crea el aerosol como consecuencia de presiones que oscilan de 5 a 7 *MPa* (50 - 70 *bar*) y que ejerce el líquido al pasar a través del orificio del boquilla. El líquido entra por la base de la boquilla tangencial y deja el orificio en forma de un cono hueco con un ángulo que varía de 40° a 140° (**Figura 4**).

El diámetro del orificio es generalmente pequeño, de 0.4 a 4 *mm*, y la capacidad de la boquilla generalmente no excede los 100 *l/h*. Cuando el caudal de entrada es elevado, se pueden utilizar varias boquillas en el compartimiento de secado. El compartimento de secado suele tener una relación longitud/diámetro alta (Mujumdar, 1995).

Con este tipo de boquilla es posible producir las gotitas dentro de una gama estrecha de diámetros, y las partículas secadas son generalmente esferas huecas. Las boquillas de presión de un fluido no son convenientes para suspensiones altamente concentradas y materiales abrasivos debido a su tendencia a obstruir y a erosionar el orificio de la boquilla. El consumo de energía de una boquilla de presión es muy bajo en comparación con el del atomizador de disco (Mujumdar, 1995).

Figura 4. Atomizador de Toberas de alta presión.



FUENTE: (NIRO ATOMIZER, 2010).

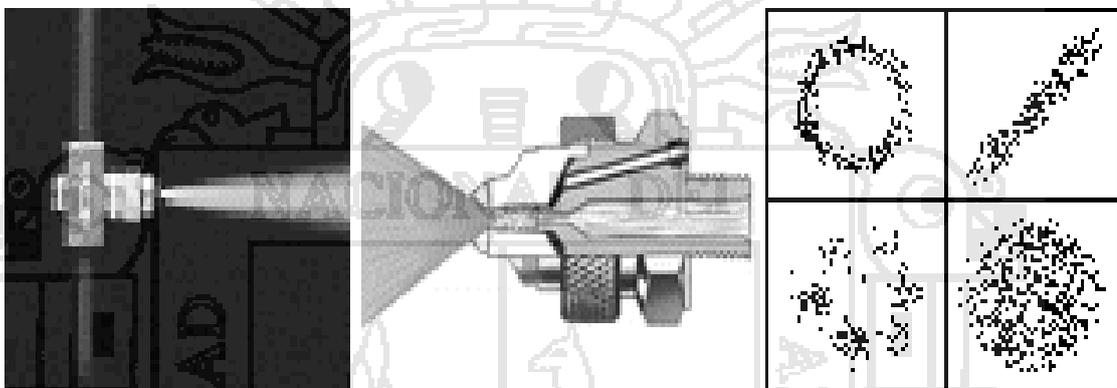
c. Toberas Neumáticas o de dos Fluidos.

En estos equipos, la atomización es provocada por un fluido secundario, que puede ser aire comprimido, es decir, la energía para la atomización es suministrada por el aire comprimido. (**Figura 5**). Estas toberas no operan a grandes capacidades y, en consecuencia; no se emplean muy frecuentemente en secadores por atomización de tamaño comercial. Su uso frecuente es para una producción a pequeña escala y a escala de planta piloto, particularmente donde se requieren partículas finas. Pero el

costo de operación adicional se asocia con el costo de producción de corriente de aire a presión, lo que hace que sea caro en producciones a escalas mediana y grande.

No son eficientes a grandes capacidades pero, su principal ventaja es que operan a presiones relativamente bajas del orden de 0 a 400 kPa/m^2 . El fluido concentrado y gas atomizante pasan separados hacia la cabeza de la boquilla. Tiene la ventaja de manejar alimentos viscosos produciendo sprays de tamaño medio, pero de pobre homogeneidad (Perry, 1980).

Figura 5. Tobera neumática de mezcla externa.



FUENTE: (NIRO ATOMIZER, 2010).

A continuación se mencionan las ventajas y desventajas del atomizador Neumático (Cook & DuMont, 1991).

Ventajas:

- Se genera un amplio rango de tamaño de partícula;
- El tamaño de partícula producido se puede controlar en función al flujo a través de la tobera y la presión del aire comprimido;
- Útil para elaborar partículas extremadamente finas (10 a 300 μm) debido a la relativa resistencia al desgaste;
- Adecuado para tratar alimentación viscosa o abrasiva;
- De mayor uso a escala de planta piloto para pequeñas capacidades de flujo;
- Costo de capital muy bajo debido a la ausencia de bomba de alta presión y disco atomizador; y,

- Funciona a presiones relativamente bajas del orden de 3 – 8 *bar*, en tanto que el fluido atomizador rara vez sobrepasa una presión de 10 *bar*.

Desventajas:

- No opera con eficiencia a grandes capacidades, por lo que no se emplea muy a menudo en secadores de atomización de tamaño comercial.

Clasificación de toberas neumáticas.

a. Toberas neumáticas de acuerdo a la presión de operación.

Existen dos grupos de toberas: (Tipe, 2004).

- Toberas de alta presión que opera entre 0.3 y 1.0 *MPa* (3 y 10 *bar*). consumo específico del aire varía generalmente en el rango de 0.3 a 1 *kg/kg* de líquido alimentado.
- Toberas de baja presión, presión de operación por debajo de 0.01 *MPa* (0.1 *bar*) con consumo específico de aire desde 4 a 10 *kg/kg* de líquido.

En la práctica, la tobera de alta presión es el tipo más común, debido a que proporciona un rociado muy fino. La presión de operación del líquido es generalmente 0.3 *MPa* (3 *bar*) (Tipe, 2004).

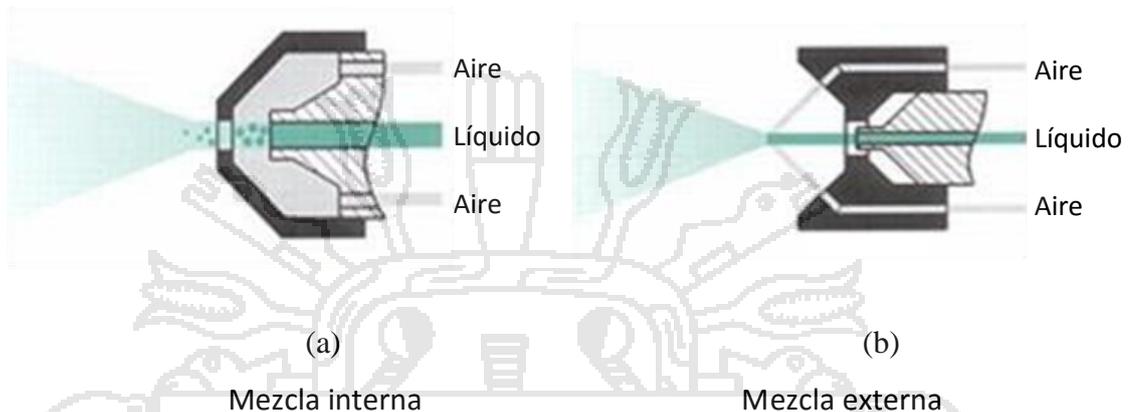
b. Toberas neumáticas de acuerdo al modo de mezclado en la tobera.

El contacto de la alimentación con el aire comprimido (mezcla) puede ser externo e interno a la tobera (Oakley, 1997).

- Tobera con mezcla interna de aire / líquido, en donde la desintegración de la fase líquida ocurre dentro del cuerpo de la tobera y en el orificio se forma el rociado (**Figura 6a**). A pesar que este diseño de la tobera permite un sistema de dispersión de alta calidad, su aplicación no está bien difundida, debido a su baja confiabilidad. La operación de la tobera sufre a menudo el depósito de partículas húmedas en la vecindad del orificio que tiende a interferir seriamente con el performance de secado constante.

- Toberas con mezcla externa (**Figura 6b**), donde la fase líquida y gaseosa se encuentra afuera del cuerpo de la tobera con el resultante efecto de la atomización. Este es el tipo más común de tobera utilizado.

Figura 6. Representación de atomizadores neumáticos.



FUENTE: (NIRO ATOMIZER, 2010).

Los atomizadores de combinación interna ofrecen la ventaja de que se obtiene mayor transferencia de energía que con los de combinación externa. Sin embargo, estos últimos permiten mayor control de la atomización debido a que tanto el líquido como el aire se controlan independientemente (Masters, 1972).

c. Capacidad y ángulo de atomización.

La velocidad del flujo es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión, y varía inversamente proporcional con la raíz cuadrada de la densidad del líquido, esta relación es solamente una aproximación. Además una mínima presión es requerida para desarrollar cualquier ángulo de la aspersion. Esta presión mínima es aproximadamente de 1.4 atm (20 psi). El incremento en presión disminuye el ángulo de la atomización, pero su influencia es despreciable, especialmente si se mide cerca del orificio de la boquilla. A mayores presiones de trabajo arriba de 14 atm (200 psi), el ángulo de la aspersion empieza a reducirse debido al efecto del aire que entra. La viscosidad tiene un efecto significante cuando un incremento en la misma produce un ángulo estrecho. Si la viscosidad es muy grande el ángulo del atomizado se reduce significativamente debido al taponamiento de la corriente, dando lugar a que la atomización cese (Masters, 1972).

d. Efecto de variables sobre el tamaño de la gota en toberas neumáticas.

Los efectos de las variables sobre el tamaño de las gotas son las siguientes: (Masters, 1972).

- **Efecto de la razón de masa aire/líquido (Mair/Mliq):** Esta razón es una de las más importantes variables que afectan el tamaño de gota. Cuando esta se hace grande el tamaño de gota se hace pequeño. El valor de esta razón debe estar entre 0.1 y 10.0. Debajo de 0.1 la atomización se deteriora rápidamente con líquidos que son fácilmente atomizados. 10.0 es el límite para obtener gotas pequeñas. Arriba de este valor, la atomización procede con exceso de energía sin una marcada disminución en el tamaño de gota. Investigadores han indicado que gotas de 5 micrones no se desintegran en gotas más pequeñas en presencia de aire a gran velocidad, pero pruebas experimentales muestran que gotas de hasta 1 micrón son obtenidas.
- **Efecto de la velocidad relativa:** La medida del tamaño de gota decrece con el aumento de la velocidad relativa. El incremento de la velocidad relativa entre el aire y el líquido en el punto de contacto, incrementa la fuerza dinámica y más energía es necesaria para la atomización. El efecto de la energía relativa empieza a ser más pronunciado cuando finos atomizados son formados a bajas velocidades de alimentación. Por lo tanto, la media del tamaño de gota está directamente relacionada con la velocidad del aire. De hecho la media del tamaño de gota varía inversamente con la velocidad del aire a la potencia de 1.14, e inversamente a la potencia de 0.57 de la fuerza dinámica del aire.
- **Efecto de la Viscosidad:** El incremento en la viscosidad aumenta la media del tamaño de gota. La complejidad del mecanismo de atomización evita una precisa variación a ser establecida. El exponente de la viscosidad está en el rango 0.30 a 0.37.
- **Efecto de la densidad del aire:** EL incremento en la densidad del aire a velocidad constante aumenta su fuerza dinámica, resultando una disminución en la media del tamaño de gota.

El resumen sobre el efecto de variables sobre el tamaño de las gotas se muestra en el **Cuadro 4.**

Cuadro 4. Efecto de las variables de proceso en las gotas para atomizadores neumáticos.

Variable	Efecto
Razón Másica aire/liquido Aumento razón $W_{aire}/W_{liq} < 0,1$ $W_{aire}/W_{liq} \geq 10$	Disminución de tamaño de gotas. Atomización deteriorativa. Límite superior para razón efectiva. Aumento para crear partículas de menor tamaño.
Velocidad relativa Aumento de velocidad de aire.	Disminución del tamaño de gota.
Viscosidad Aumento viscosidad fluido. Aumento viscosidad de aire.	Aumento tamaño de gota. Disminución tamaño de gota.

FUENTE: (MASTERS, 1991).

2.4.3. Cámara de Secado.

La principal función de la cámara es encerrar el spray que se produce y asegurar que las gotas sean secadas con el flujo de gas caliente y para suministrar un tiempo de residencia suficiente para evaporar la humedad. La velocidad de secado es muy alta en el primer periodo de secado cuando la mayoría de la humedad es evaporada en intervalos de tiempo muy corto, pero durante el segundo periodo de secado la velocidad cae rápidamente y requiere más tiempo para reducir aún más la humedad del producto hasta un nivel aceptable. Curvas de velocidad de secado para una gota pueden suministrar información del tiempo de residencia necesario en el secado, pero debido a la diferencia en características de evaporación de una gota simple y las atomizadas requieren de tiempo de residencia establecidos en secadores de planta piloto. El tiempo de residencia puede ser calculado, en primera instancia, dividiendo el volumen de la cámara por el caudal total de aire. Es de particular importancia que las gotas no choquen contra las paredes de la cámara cuando todavía están húmedas (Masters, 1991).

Las cámaras son diseñadas para descargar la mayoría de los productos en la base (descarga de productos primario), o para transportar todo el producto con el aire de

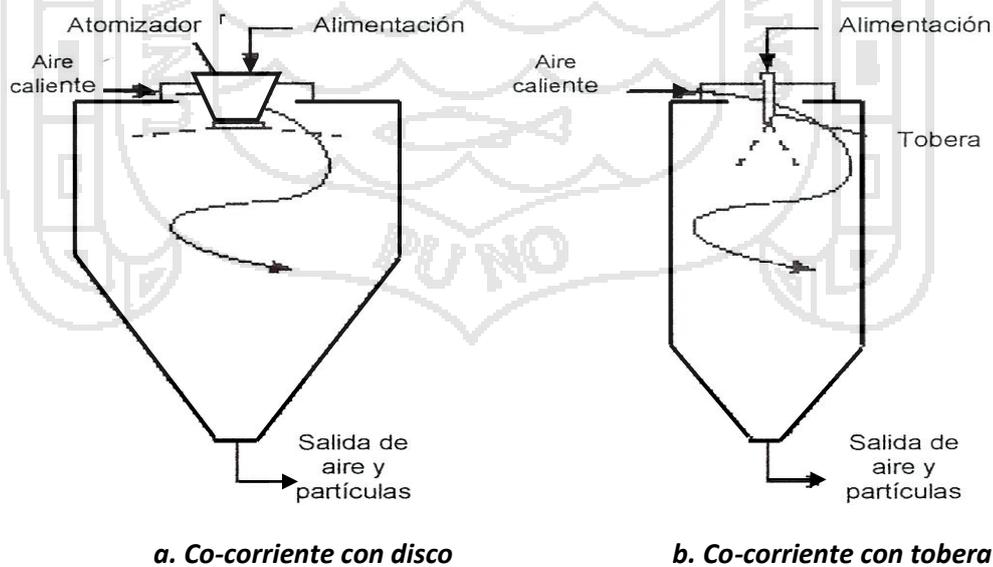
salida y recuperarlo posteriormente en otra unidad. El tamaño óptimo de la cámara y su forma dependen del tamaño de la gota y la forma del spray producido por el atomizador (Masters, 1991).

a. Cámara de secado de flujo en paralelo o Co-corriente.

En la **Figura 7**, se ilustran dos de este tipo, tanto el atomizador como el flujo de aire están localizados en la cima de la cámara. Los tipos (a) y (b) son los más comunes. El tipo (a) tiene flujo de aire rotatorio e inclinado esto se logra por una entrada tangencial o por aspas inclinadas. El tipo (b) tienen línea de corriente inclinado, el aire no crea rotación por el uso de platos perforados o aspas rectas (Masters, 1991).

El movimiento del aire caliente y de las partículas a través de la cámara de secado ocurre en la misma dirección. La temperatura del producto en la descarga del secador es más baja que la temperatura del aire en la salida del extractor, por lo que es ideal para los productos sensibles al calor de secado. Al funcionar con el atomizador rotatorio, el dispersor del aire crea un alto grado de rotación, dando temperaturas uniformes a través de la cámara. Sin embargo, con igual éxito, se utiliza a menudo una circulación de aire que no rota en secadores por atomización, usando los dispositivos de atomización llamados toberas (NIRO ATOMIZER, 2010).

Figura 7. Cámara de secado flujo en co-corriente.



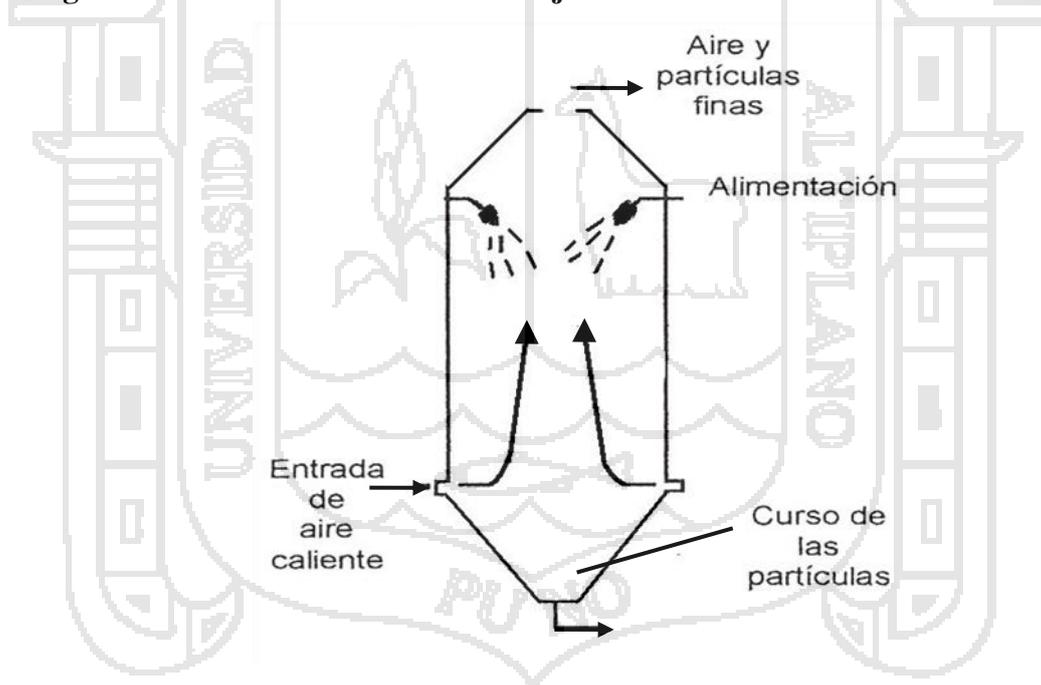
FUENTE: (OAKLEY, 1997).

Los más comunes son los de cámara cilíndrica y base cónica, este tipo de diseño es favorable para algunos casos por su bajo costo de construcción y mínima altura requerida.

b. Cámara de secado de flujo en contracorriente.

En contracorriente el arreglo es inverso, por lo general el material se introduce por la cima y el gas caliente por la base de la cámara (**Figura 8**). El aire disperso crea varias rotaciones en la entrada a la cámara de secado pero debido a la altura de la cámara, el movimiento rotacional no puede sostenerse e regiones superiores de la cámara. Este diseño puede ser usado únicamente para materiales no sensibles al calor. Es menos común que el arreglo en paralelo, el uso del flujo es contracorriente puede ser necesario para impartir el producto una calidad particular, por ejemplo para secar polvos de detergentes (Masters, 1991).

Figura 8. Cámara de secado con flujo en contracorriente.



Contracorriente con Tobera

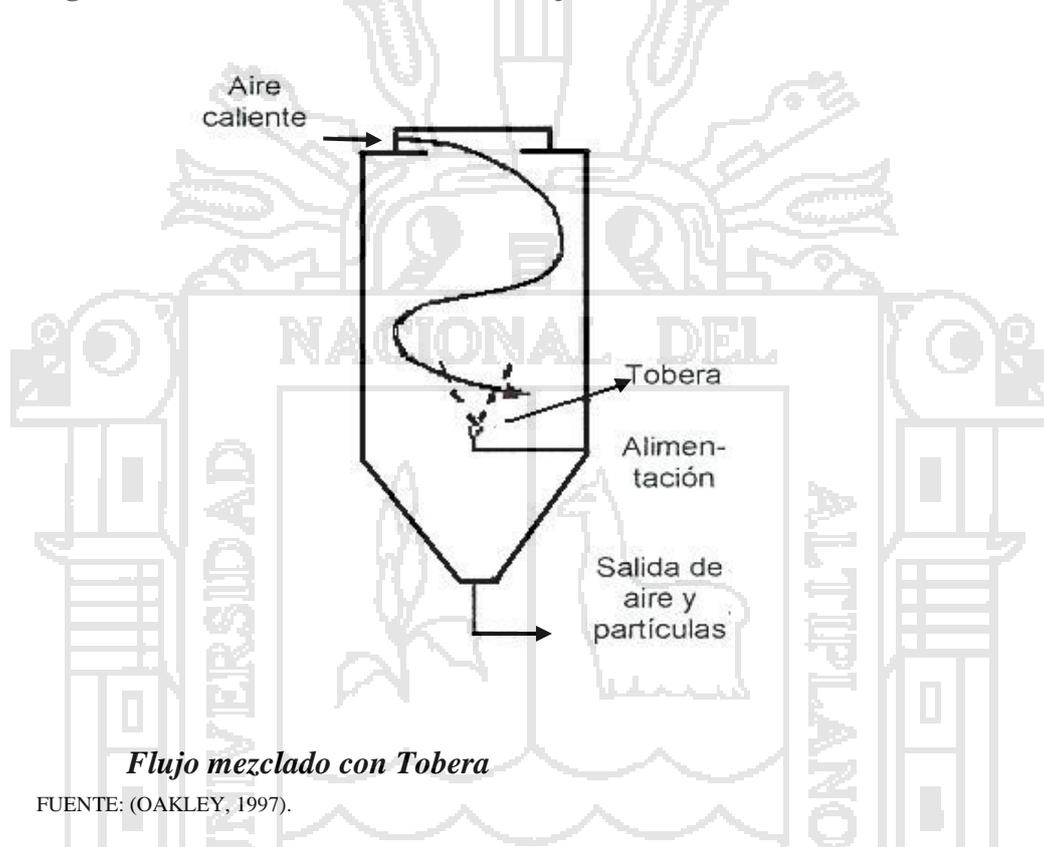
FUENTE: (OAKLEY, 1997).

c. Cámara de secado de flujo mezclado.

Otro tipo de diseño es el de flujo mezclado que es una combinación del paralelo y contracorriente (**Figura 9**), esto se realiza por uno de los arreglos siguientes:

- Flujo de aire en dos direcciones cuando el flujo de producto es uno; y,
- Flujo de aire en una dirección cuando el producto fluye en dos.

Figura 9. Cámara de secado con flujo mezclado.



En el arreglo de esta figura, el alimento es atomizado hacia arriba en un flujo de aire rotatorio creado por el dispersor de aire. El spray viaja hacia arriba y desacelera para luego caer, este tipo de diseño es llamado “fuente” y con este el producto puede ser transportado con el aire de salida o sufre separación en la base cónica de la cámara (Masters, 1991).

Las cámaras de secado son construidas en acero inoxidable, aluminio o aleaciones especiales. El acero inoxidable representa la mayoría de las cámaras que operan diariamente en la industria de alimentos y de productos farmacéuticos. En cualquier caso la selección del material de construcción depende de factores tales como: la

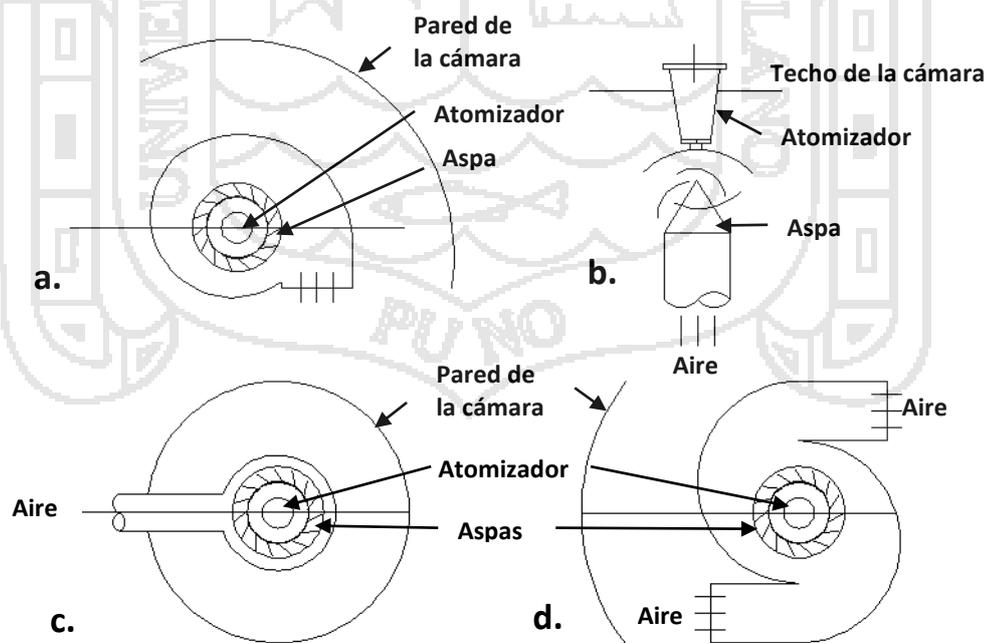
corrosión, no contaminar el producto, fácil lavado y fallas estructurales que se puedan presentar después de iniciar o apagar el equipo (Masters, 1991).

DISPERSOR DE AIRE.

El aire entra a la cámara de secado a través del dispersor de aire. La función de este es la de proveer el calor requerido para el secado, controlar el recorrido de las gotas o partículas durante el secado y remover la humedad vaporizada de la cámara. Donde el dispersor de aire y el atomizador son colocados juntos, el flujo de aire puede influir en la distribución del tamaño de gota del atomizador. Algunos tipos de dispersores de aire se muestran en la **Figura 10**. El dispersor de aire crea varios grados de rotación del aire en la entrada de la cámara pero, debido a la altura de la misma, el movimiento rotatorio no puede ser mantenido en la región alta de la cámara (Masters, 1972).

Lo más común es que el dispersor de aire esté colocado sobre el techo del secador y el atomizador en el centro del dispersor de aire asegurando de esta manera una mezcla óptima del aire y las gotitas atomizadas (Westergaar, 2004).

Figura 10. Tipos de dispersores de aire de flujo rotacional alrededor del atomizador.



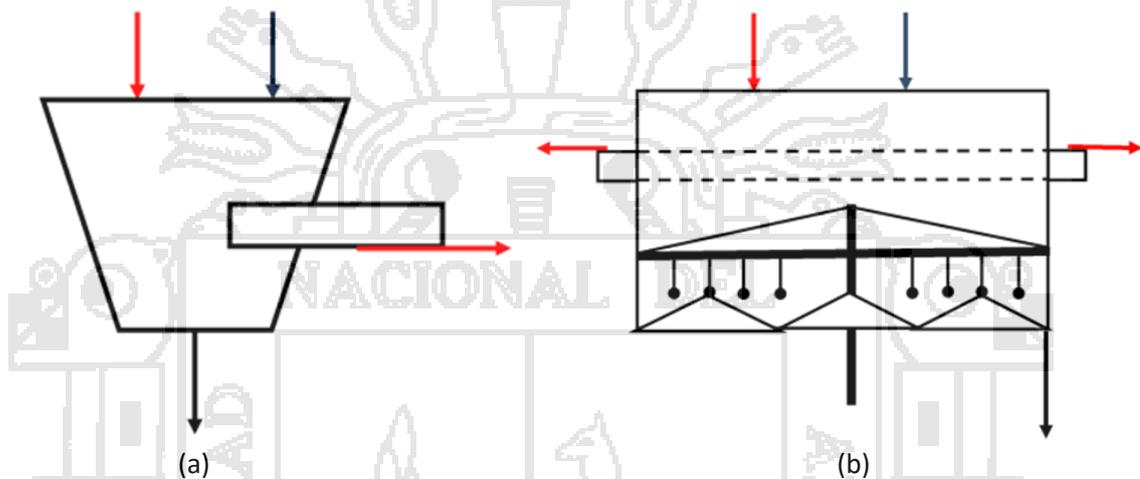
a. Entrada tangencial, b. Aspas inclinadas provocando torbellino, c. Aspas inclinadas, d. Entrada tangencial; doble entrada.

FUENTE: (MASTERS, 1972).

2.4.4. Descarga del producto seco de la cámara de secado.

En la mayoría de las cámaras diseñadas, el producto seco queda en la base, únicamente una fracción entra con el aire al sistema de recuperación posterior. En la **Figura 11(a)** se presenta una base cónica para descarga inicial de producto, el aire sale por el lado cónico de la cámara (Masters, 1991).

Figura 11. Bases para descarga inicial de producto.



FUENTE: (MASTERS, 1991).

En la **Figura 11(b)** se descarga el producto por medio de una barredora y la base de la cámara es plana. El área de la base es grande y el producto está sujeto a manejo mecánico.

Tanto los arreglos (a) como (b) pueden manejar productos aglomerados, productos termoplásticos y polvos con alto contenido de grasa se manejan mejor en secadores de base cónica. En el **Cuadro 5** se muestran las ventajas y desventajas de ambas bases.

Cuadro 5. Ventajas y desventajas de las cámaras de base cónica y plana.

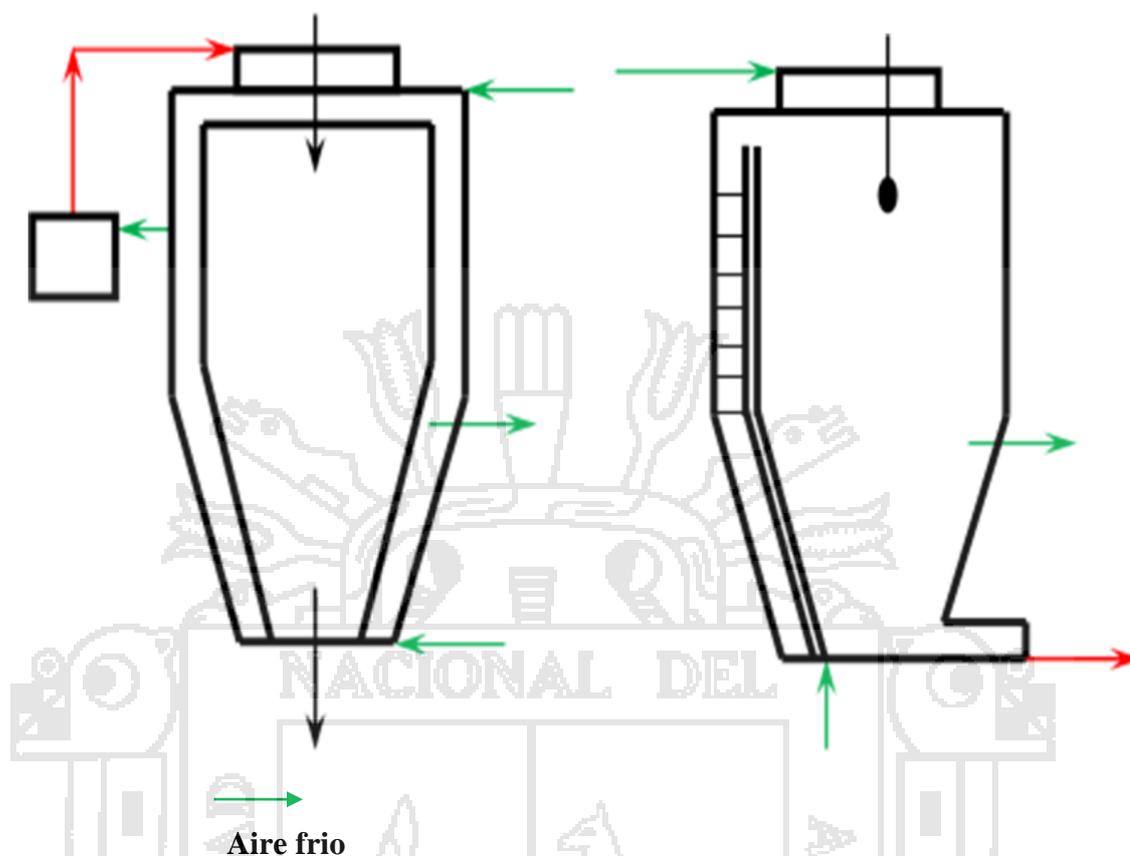
Diseño de cámara cónica	Cámara de base plana
<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidad maneja amplia variedad de productos. • Apto para materiales sensibles al calor, giroscópicos y grasosos. • Dos puntos de descarga. • Permite adicionar otras técnicas de secado. • Partes no móviles. • No puntos muertos o formación de depósitos. • Aplicable operaciones con alto grado de higiene. 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo de producción. • Fácil acceso para limpieza manual. • Cámara de baja altura si se encuentra una barredora en el piso.
<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gran altura con relación a su diámetro. • Difícil acceso para limpieza manual, especialmente los secadores grandes. 	<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Todo material seco es transportado a un colector (presentan pérdidas). • Requiere sistema mecánico y de succión para remover el producto. • Disponible únicamente para sólidos fáciles de secar. • No es apto para operaciones.

FUENTE: (MASTERS, 1991).

Diseños refinados para cámaras de secado.

Son usados para manejar productos especiales tales como los termoplásticos o pegajosos, la temperatura en las paredes de la cámara debe mantenerse baja, tal como se ilustra en la **Figura 12**, el esquema (a) donde la cámara es concéntrica y el aire frío viaja por el espacio concéntrico. La pared recibe aire de enfriamiento para barres las paredes, esquema (b), y evitar el depósito del producto: también se emplean martillos o vibradores eléctricos o neumáticos que son montados en las paredes para desalojar el producto constantemente (Masters, 1991).

Figura 12. Diseños combinados de cámaras de secado.



FUENTE: (MASTERS, 1991).

2.4.5. Aplicaciones del secado por aspersión.

- **Café instantáneo:** Extractos de café con un contenido de sólidos de 15% a 30% se pueden concentrar hasta un 60% en sólidos en un evaporador de película o concentrador rotatorio de película fina bajo vacío, antes de ser atomizados; el producto seco consiste en partículas esféricas de alrededor 300μ y densidad global 0.22 g/cm^3 . Los parámetros de secado más comunes son: aire de entrada $250 \text{ }^\circ\text{C}$ y aire agotado $110 \text{ }^\circ\text{C}$ (Barbosa *et al*, 2000).
- **Productos lácteos:** Leche concentrada con un contenido en sólidos de 40% a 50%, se seca hasta un contenido de humedad de 2% a 5% con una temperatura del aire caliente de entrada de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ a $170 \text{ }^\circ\text{C}$ (Masters, 1991).

- **Te instantáneo:** El proceso de te requiere la extracción del mismo a partir de las hojas; la extracción produce una solución de un contenido en sólidos de 5% a 20%, que son concentrados hasta un 40% antes de ser atomizados; el secado se lleva a cabo a una temperatura de 200 °C a 250 °C con calentamiento indirecto (Mafart, 1994).
- **Huevos deshidratados:** El contenido de sólidos de los huevos enteros es de 25% a 27% y para yemas es de 45% a 48%. Previa pasteurización, la operación de secado se lleva a cabo utilizando una temperatura de entrada del aire de 145 °C a 200 °C en un secadero con flujo equicorriente con atomizadores rotatorios y de inyección (Masters, 1991).
- **Atomización de enzimas:** Las enzimas se procesan en secaderos estándar con flujo en equicorriente; las temperaturas de procesado son entradas de aire 143°C, salida de aire 71 °C, temperatura del producto 55 °C y contenido de humedad del producto de 10% a 20% (Barbosa & Vega, 2000).
- **Atomización de microorganismos y levaduras:** La atomización de bacterias puede llevarse a cabo utilizando nitrógeno como medio de secado. Ejemplo de parámetros del proceso son alimentos con un contenido de sólidos de 6%, temperatura de entrada por debajo de 95 °C, temperatura de recuperación del producto 50 °C y contenido de humedad final 4% (Masters, 1991).

A continuación en el **Cuadro 6**, se listan una serie de productos cuyo procesamiento incluye propiamente el secado por aspersion o modificaciones tales como: enfriamiento spray, reacción spray o absorción spray y sus condiciones de operación más sobresalientes (Masters, 1991).

Cuadro 6. Productos obtenidos por secado spray.

Producto	Sólidos en el Alimento	Temperatura Alimento (°C)	Humedad Final (%)	Temperatura (°C)	
				Entrada	Salida
Resina Acrílica.	40-48	10-25	0.5-1.0	250-300	90-95
Oxido de Aluminio.	45-65	10-20	0.25-2.0	300-500	95-100
Antibióticos.	10-30	0-10	1.0-2.0	140-190	90-110
Bentonita.	18-20	15-20	1.5-2.0	400-550	125-130
Plasma Sanguíneo.	25-27	5-10	6.0-7.0	220-275	75-80
Catalizador (Ni, Zn).	10-45	10-50	1.0-2.5	400-700	120-150
Café Instantáneo.	35-55	20-30	3.0-4.5	220-300	85-100
Detergentes.	60-70	60-65	6.0-10.0	300-350	85-110
Enzimas.	30-40	10-20	3.0-5.0	140-180	75-100
Flavorizantes.	30-50	10-20	4.0-5.0	150-180	75-95
Funguicidas.	35-55	10-15	1.0-2.0	250-300	80-100
Herbicidas.	45-50	10-15	2.0-4.0	140-250	75-110
Óxido de Hierro.	50-55	15-20	0.5-3.0	300-450	100-140
Maltodextrina.	50-70	50-85	4.0-5.0	200-300	95-100
Nata de Leche.	47-52	60-70	3.5-4.0	175-240	75-95
Proteína Vegetal	20-50	15-60	2.0-3.0	180-250	90-110
Sílica Gel.	12-20	10-40	6.0-8.0	400-750	120-140
Vitaminas A, B2, E.	15-50	25-60	3.0-5.0	150-250	90-105
Sorbitol	65-70	50-60	0.3-0.6	120-180	85-95

FUENTE: (MASTERS, 1991).

2.4.6. Selección del tipo de atomizador.

La selección del atomizador o boquilla depende de la naturaleza del alimento y de las características del producto deseado. En todos los tipos de atomizadores la cantidad de energía se incrementa cuando se requieren tamaños de gotas pequeñas. El grado de atomización depende de las propiedades del fluido, cuando se tienen altos valores

de viscosidad y tensión superficial resultan tamaños grandes de gotas para la misma cantidad de energía disponible para la atomización. Cuando se desea una distribución de tamaño de partícula se puede utilizar discos rotatorios o boquillas (Perry, 1980).

La selección del tipo de atomizado depende de la naturaleza y de la calidad de alimentación y de las características deseadas del producto desecado. Cuanta más alta es la energía para la dispersión, más pequeñas son las gotitas generadas (Mujumdar, 1995).

Cook y DuMont (1991) señalan que tanto los atomizadores de disco y de toberas producen virtualmente idéntico tipo (tamaño y distribución) de partículas.

En el **Cuadro 7**, se muestran intervalos de tamaños de partículas de algunos productos en polvo.

Cuadro 7. Tamaño de partículas de productos en polvo (μm).

Productos	Tamaño (μm)
Leche	30 – 250
Café	80 – 400
Pigmentos	10 – 200
Cerámica	30 – 200
Productos farmacéuticos	5 – 50
Productos químicos	10 – 1000

FUENTE: (FILKOVÁ, *et al.*, 1985).

Teniendo en cuenta las consideraciones dadas anteriormente, se analiza las ventajas y desventajas de cada tipo, resaltando lo siguiente: (Tipe, 2004).

- Cuando se requiere una alta producción a escala industrial, en general la selección es por el atomizador de disco centrífugo, por ser muy flexible, pero este dispositivo no se dispone en el mercado nacional por sus características particulares.

- A escala industrial el que sigue es el atomizador de tobera de alta presión, pero como se ha señalado líneas arriba tiene limitaciones en su uso para cierto tipo de alimentación líquida (suspensiones) a alta presión por el rápido desgaste de la tobera y alto costo de la bomba para lograr la atomización.
- Para pequeña escala y planta piloto, el atomizador adecuado es el de tobera neumática, por ser barato, de sencilla fabricación de las toberas, la energía requerida para la atomización es el de aire comprimido. Además, tiene la ventaja de que podemos tratar un amplio rango de soluciones y el producto seco obtenido es relativamente grande en su tamaño, lo que más comúnmente se prefiere en la industria de extractos de colorantes, medicina y alimentos.

2.4.7. Sistema de alimentación.

Usualmente se usa una bomba para alimentar la solución y alternativamente mediante un tanque cuya alimentación sea por gravedad.

Para el control de la intensidad de alimentación se tiene a menudo con válvulas de paso y cañerías de diámetro estándar, como las que se usan en las instalaciones de agua, con un tanque de recepción que dependiendo de la sustancia y sus características peculiares, se tenga que adaptar un sistema de agitación (Geankoplis, 1998).

Existen 16 tipos de bombas, las cuales están agrupadas para facilitar su elección. Sin embargo, esto no es suficiente ya que no hay un criterio para su elección. Con el fin de ayudar a solucionar este problema, los fabricantes suministran cartas o esquemas tales como arboles de decisión. En tales esquemas, las bombas están dispuestas funcionalmente; por ejemplo cuando se emplean atomizadores rotatorios la bomba de alimentación más común es el de tipo moni o el tipo centrifugo. La bomba mono puede manejar concentrados a más altas velocidades que la bomba centrifuga con menor energía (Bonnell & Poe, 1999).

2.4.8. Sistemas de recolección de sólidos.

La mayor parte de los productos secos caen hasta el fondo de la cámara y se extrae con la ayuda de rastrillos, tornillos sin fin, y válvulas rotatorias. En otros secadores todo el producto seco sale de la cámara de secado con el aire. En todos los secadores es necesario limpiar el aire que sale y recuperar el producto. Para este fin se utilizan tres métodos normalmente: ciclón en seco, los depuradores en húmedo y los filtros de saco (Geankoplis, 1998).

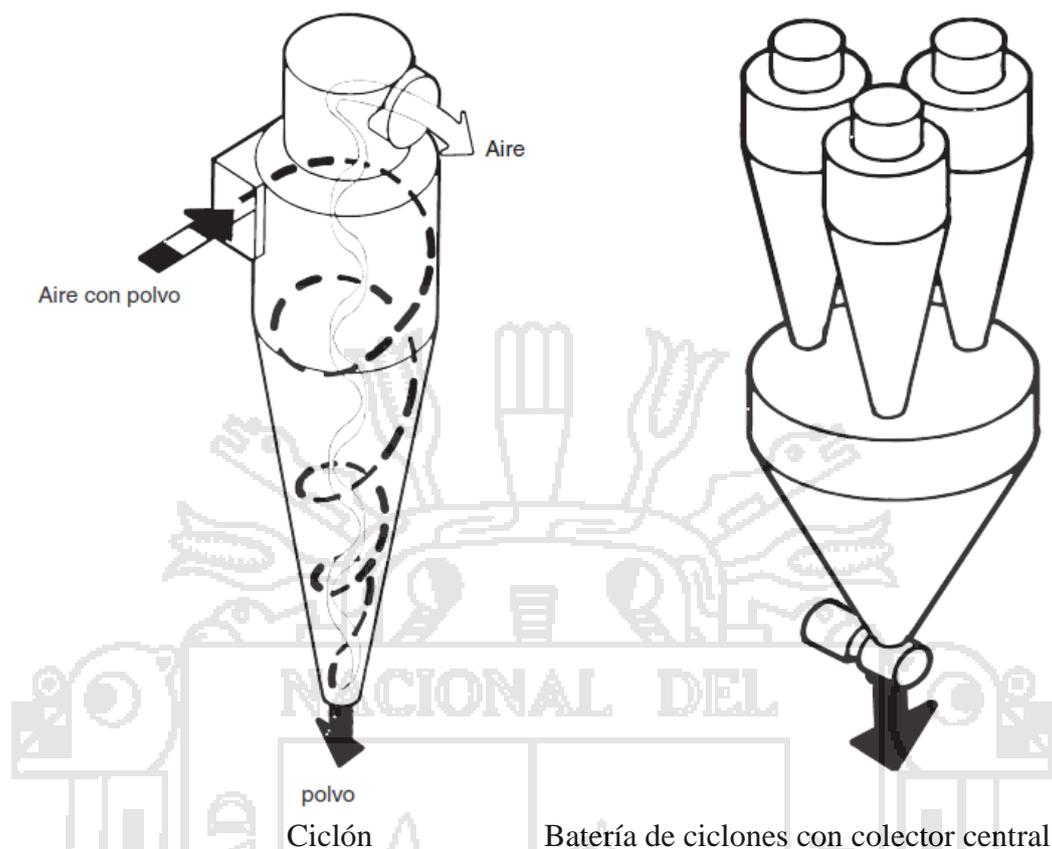
En general se usan:

- Para polvos secos: ciclones, filtros de bolsa, precipitadores electrostáticos; y,
- Para polvos húmedos: scrubber húmedo (Venturi), ciclón húmedo.

a. El ciclón.

Son los más simples y fáciles de fabricar de los equipos de procesos. Ellos son usados extensivamente en la industria de procesos químicos para separación gas-líquido. En las refinerías son usados en los reactores y generadores de unidades de craqueo catalítico, en alimentos, farmacia y la industria metalúrgica. Este equipo tiene la ventaja de ser altamente eficiente cuando su construcción es adecuada, su mantenimiento es sencillo ya que no hay partes móviles y además de fácil limpieza (**Figura 13**). La teoría de la operación del ciclón se basa en los remolinos (vórtices), donde la fuerza centrífuga actúa sobre cada partícula forzándola a dejar el eje del ciclón y dirigirse hacia la pared interna del ciclón. Sin embargo, el movimiento en dirección radial es el resultado de dos fuerzas opuestas: La fuerza centrífuga que actúa moviendo la partícula hacia la pared mientras que la fuerza del aire actúa llevando las partículas en el eje. La fuerza centrífuga predomina y por lo tanto se produce la separación (Zenz, 2001).

Figura 13. Esquemas de ciclones convencionales.



FUENTE: (WESTERGAAR, 2004).

Un ciclón convencional consiste de un cilindro con una apertura tangencial por donde viaja la corriente de gas con las partículas generadas en el secador. En general, el diseño final del ciclón es un compromiso entre la eficiencia y complejidad del equipo con las consideraciones de espacio y costo (Zenz, 2001).

Existen dos tipos básicos de ciclones y dependen de la dirección que toma el gas al dejarlo: flujo inverso y flujo único. El ciclón de flujo inverso es el más usado donde el gas sale a través de un tubo central en el mismo extremo de la entrada tangencial, la tubería del gas de salida se extiende axialmente hacia el cuerpo, el sólido es descargado a través de un orificio central en la cumbre de la sección cónica (Koch & Licht, 1977).

Se presentan cuatro tipos de entrada al ciclón tangencial, axial, helicoidal o espiral, cada tipo tiene sus ventajas y aplicaciones. La principal característica de funcionamiento de los ciclones es la caída de presión del flujo y la eficiencia de la separación.

La caída de presión estática, medida entre la entrada y la salida del gas, es usualmente proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo. La velocidad característica puede ser definida para un gas en un ciclón por varias vías pero la más simple y apropiada está basada en la sección transversal del cuerpo cilíndrico del ciclón (Zenz, 2001).

b. Filtros de mangas.

El promedio de pérdida de polvo en un ciclón normal de alta eficiencia no debería exceder el 0.5% ($\approx 250 \text{ mg/Nm}^3$) al secar leche descremada. Sin embargo, las normas ambientales podrían determinar que el valor 0.5% es demasiado alto. A partir de 2007 la UE demanda una pérdida de polvo que es $<10 \text{ mg/Nm}^3$. Por eso se necesita una limpieza final del aire. Esto se realiza normalmente con filtros de mangas que consisten en numerosas mangas o filtros colocados de tal forma, que cada uno de ellos recibe aproximadamente la misma cantidad de aire. La dirección del aire es desde fuera y a través del material filtrante, hacia la parte interior de la manga en donde el aire limpio entra en un conducto de salida. Con la selección correcta del material filtrante se obtienen altos rendimientos y una recogida de partículas de 1 micra. El polvo se recoge en el fondo y se descarga mediante una válvula rotativa. Estos equipos se emplean muy a menudo en los secadores de proteína de suero o clara de huevo (Westergaar, 2004).

2.5. EFECTOS DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN EN EL CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECADOR.

2.5.1. Efecto de la temperatura en la entrada.

El incremento en la temperatura en la entrada disminuye el calor requerido por el secador para generar un producto con determinadas características. El calor consumido por el secador es expresado como la velocidad de calor específico por

ejemplo: kilocalorías por kilogramo de agua evaporada o kilocalorías por kilogramo de producto seco obtenido (Masters, 1991).

El efecto de la temperatura de entrada mencionado en el párrafo precedente se muestra en el **Cuadro 8**.

Cuadro 8. Efecto de la temperatura en la entrada en el calor específico consumido para un sistema integrado de flujo mezclado con secador spray fluidizado con boquilla atomizadora.

	Temperatura aire a la entrada (°C)			
Temperatura de aire a la entrada	200	240	350	400
Masa de evaporación (Kg/h)	1000	1000	1000	1000
Calor específico consumido (Kcal/kg H ₂ O evaporada)	1165	1040	890	840
Masa de aire a la salida (Kg/h)	34200	24800	15900	13250
Temperatura de aire a la salida (°C)	75	75	75	75

FUENTE: (MASTERS, 1991).

2.5.2. Efecto del contenido de sólidos en el alimento.

El efecto de los sólidos contenidos en el alimento en la cantidad de humedad evaporada por unidad de peso de polvo producido se presenta en el **Cuadro 9**. El secado por aspersion es un método donde se pierden muchos volátiles y para obtener la máxima utilización de calor se deben alimentar la máxima cantidad de sólidos posibles. El nivel máximo lo determina dos parámetros: la facilidad para bombear y atomizar. Incrementos en los sólidos alimentados de 50 a 60% reduce el calor perdido en un 50%. Sin embargo, muchos secadores operan con bajos niveles de sólidos y comparativamente bajas temperaturas de secado estas condiciones son dictadas por las propiedades del alimento (Masters, 1991).

Cuadro 9. Efecto de los sólidos en el calor requerido para producir un (1) kilogramo de producto.

Sólidos alimentados (%)	Calor requerido (Kcal/kg producto)	Sólidos alimentados (%)	Calor requerido (Kcal/kg producto)
5	11870	40	950
10	5630	50	640
15	3550	60	430
20	2510	70	280
30	1470		

FUENTE: (MASTERS, 1991).

2.5.3. Efecto de la diferencia de temperaturas.

Aumentar la diferencia de las temperaturas, entrada menos salida (ΔT) con reducción en la temperatura a la salida, reduce el calor requerido para evaporar un (1) kilogramos de agua (Masters, 1991).

Este hecho se representa en el **Cuadro 10**.

Cuadro 10. Efecto de la temperatura en la entrada en el calor específico consumido para un sistema integrado de flujo mezclado spray fluidizado con boquilla atomizadora.

Diferencia de temperatura ΔT °C	Calor requerido (Kcal) para evaporar 1 kg H ₂ O
170	720
200	680
210	645
Base: T° entrada = 300 °C, sólidos alimentados: 50%, humedad final: 2%	

FUENTE: (MASTERS, 1991).

2.5.4. Efecto de la humedad.

El contenido de humedad residual depende de la humedad del aire a la salida de la cámara de secado. En la mayoría de las aplicaciones, las condiciones de humedad a la salida están por debajo de los niveles que pueden inhibir la operación de secado. Sin embargo, para productos higroscópicos, la humedad puede ser un factor controlante. Para lograr un nivel máximo de secado y maximizar la capacidad de la planta se

requiere la deshumidificación del aire a la entrada. En el **Cuadro 11**, se ilustra el efecto de la humedad ambiente en la capacidad de secado (Masters, 1991).

Cuadro 11. Efecto de la humedad del ambiente en la capacidad de secado.

Humedad ambiente (g/Kg)	12	20
Máxima humedad a la salida (g/Kg)	43	43
Temperatura de aire a la entrada (°C)	235	203
Temperatura aire a la salida (°C)	90	90
Sólidos alimentados/Temperatura (%/°C)	68/70	68/70
Masa de evaporación (Kg/h)	789	605
Humedad final (%)	2-3	3-4

FUENTE: (MASTERS, 1991).

2.5.5. Efectos de la temperatura del alimento.

Incrementando la temperatura del alimento se reduce el calor requerido para producir una unidad másica de producto seco. El precalentamiento generalmente se lleva a cabo para (Masters, 1991):

- Reducir la viscosidad en el alimento;
- Prevenir la cristalización del alimento que pueda causar daños en el atomizador;
- Control microbiológico; y,
- Activación de enzimas.

2.5.6. Principales variables del proceso de secado por atomización.

Las condiciones utilizadas para el secado por atomización: caudal del líquido de entrada, caudal del aire de atomización, temperatura y humedad del aire de entrada, caudal de aire de secado y la aspiración, van a influenciar sin lugar a dudas las características del producto en polvo obtenido:

- Humedad final del producto;
- Rendimiento de producción;
- Temperatura de salida; y,
- Tamaño de partícula.

La optimización de estos parámetros se hace generalmente por un proceso de “ensayo y error”, si bien es posible predecir la influencia de cada una de estas variables de manera individual. La influencia de cada una de estas variables en el secado por atomización se presenta en el **Cuadro 12** (Masters, 2002).

Cuadro 12. Influencia de las variables del secado por atomización.

Parámetro /dependencia	Caudal alto del aire de secado	Humedad del aire de entrada alta	Temperatura de entrada elevada
Humedad final del producto	Mayor humedad; pues baja la presión parcial del agua evaporada (↑↑)	Menor rendimiento; pues más humedad puede conducir al pegado del producto (↓)	Mayor rendimiento; pues se evita la eventual pegajosidad (↑)
Rendimiento de producción.	Mayor rendimiento; en la separación en el ciclón (↑↑)	Menor rendimiento; pues más humedad puede conducir al pegado del producto (↓)	Mayor rendimiento; pues se evita la eventual pegajosidad (↑)
Temperatura de salida	Mayor temperatura; pues hay menos pérdidas de calor basada en la entrada total de energía (↑↑)	Mayor temperatura; pues hay más energía almacenada en humedad (↑)	Mayor temperatura de salida; pues hay una proporción directa (↑↑↑)
Tamaño de partícula	No afecta	No afecta	No afecta
Parámetro/dependencia	Caudal de aire de atomizado alto	Caudal del líquido de entrada alto	Alta concentración de solutos a atomizar
Humedad final del producto	No afecta	Mayor humedad más agua conduce a una presión parcial más alta (↑↑)	Menor humedad habrá menos agua para evaporar, menos presión parcial (↓)
Rendimiento de producción	No afecta	Depende de la aplicación (↑↓)	Mayor rendimiento pues partículas más grandes conducen a una mejor separación (↑)
Temperatura de salida	Más cantidad de aire fresco que tiene que calentarse (↓)	Menor temperatura; pues se evapora más cantidad de agua (↓↓)	Mayor temperatura; pues es menor la cantidad de agua evaporada (↑↑)
Tamaño partícula	Disminuye el tamaño pues aumenta la energía para la dispersión del fluido (↓↓↓)	Mayores partícula; pues hay mayor cantidad de fluido a dispersar (↑)	Mayor tamaño de las partículas secadas; pues hay más producto (↑↑↑)

FUENTE: (MASTERS, 2002).

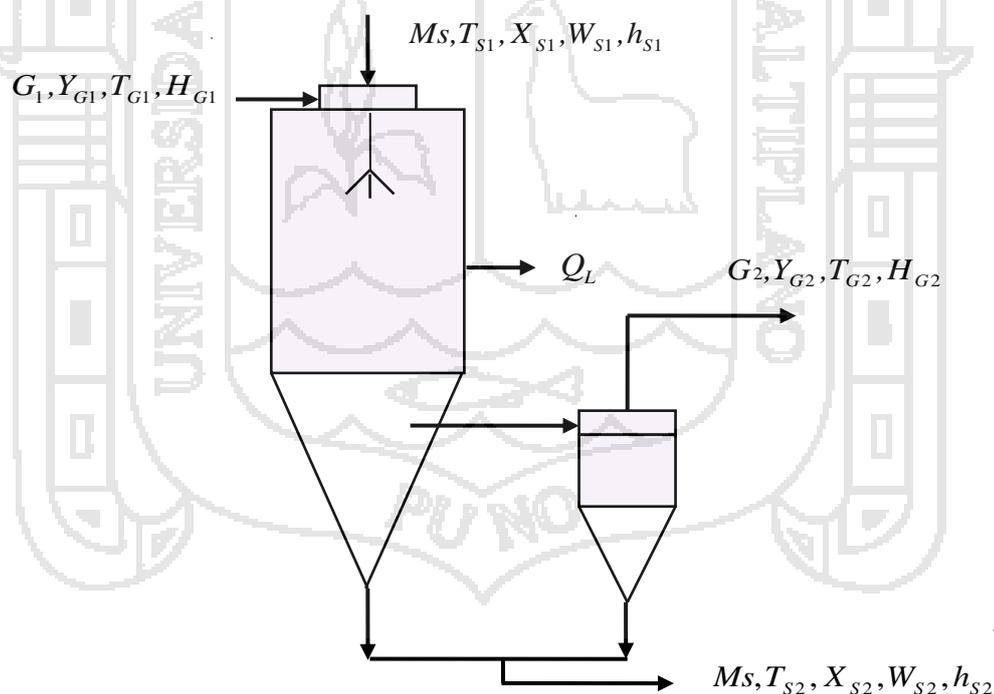
2.6. DISEÑO DE UN SECADOR POR ATOMIZACIÓN.

El secado por atomización constituye una de las operaciones unitarias más importantes y ventajosas en la industria moderna, con un amplio futuro en la ingeniería alimentaria. A pesar de ello, aun no se cuenta con suficientes estudios teórico prácticos, con la profundidad necesaria, para realizar el diseño del secador por atomización, debido al complejo mecanismo de transferencia simultánea de calor, masa y cantidad de movimiento que tiene lugar durante el proceso (Escamilla, *et al.*, 1993).

2.6.1. Balance de masa y energía.

En la **Figura 14**, se muestra el diagrama de flujo para un secado por atomización donde el gas de secado fluye en paralelo con el flujo de alimentación. El gas es calentado previamente a ser introducido a la cámara de secado.

Figura 14. Esquema de balance de materia y energía.



FUENTE: (MUJUMDAR, 1995).

La nomenclatura de cada fórmula se encuentra descrita en el **Anexo 5**.

a. Balance de Masa.

El flujo de alimentación se obtiene al aplicar un balance de masa al secador con respecto al agua. Suponiendo que no existe acumulación y por tanto se obtiene una ecuación de la siguiente forma:

- Balance de masa con respecto al agua para la fase dispersa:

$$M_s W_{s1} = M_s W_{s2} + M_{evap} \tag{1}$$

- Agua evaporada:

$$M_{evap} = M_s [W_{s1} - W_{s2}] \tag{2}$$

- Balance global para ambas fases:

$$\begin{aligned} M_s W_{s1} + G_1 Y_{G1} &= M_s W_{s2} + G_2 Y_{G2} \\ G_1 &= G_2 = G \quad (\text{Kg de aire inerte}) \\ M_s (W_{s1} - W_{s2}) &= G (Y_{G2} - Y_{G1}) \end{aligned} \tag{3}$$

- Flujo de alimentación total:

$$F = \frac{M_s}{X_{s1}} \tag{4}$$

b. Balance de energía.

Cuando se especifica las temperaturas del aire a la entrada y salida de la cámara de secado, el balance de energía permite determinar el flujo de aire requerido a través del secador de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Energía que ingresa = Energía que sale + Energía perdida

$$G H_{G1} + M_s h_{s1} = G H_{G2} + M_s h_{s2} + Q_L \tag{5}$$

Donde:

$$H_G = (1.005 + 1.88Y_G)(T - T_{ref}) + [Cp_V(T - T_{ref}) + \Delta H_{V(ref)}] Y_G \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$hs = (Cp_s + W_s Cp_{H_2O})(T - T_{ref}) \quad \text{Ecuación (7)}$$

De la combinación de la ecuación de balance de masa y energía se determina el flujo de aire (G) como agente secante de acuerdo a las condiciones de operación.

c. Calor necesario.

El calor necesario para obtener una humedad deseada se determina por la variación en el calor sensible del aire desde la entrada hasta la salida del secador, y viene dada por la ecuación:

$$Q = Gx Cp_G (T_{G1} - T_{amb}) \quad \text{Ecuación (8)}$$

El calor total suministrado al secador, se calcula dando un factor de seguridad de 20% por pérdida de calor a través de la superficie del calefactor y del equipo, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_T = 1.20 \times Q \quad \text{Ecuación (9)}$$

2.6.2. Ecuaciones de diseño para el dimensionamiento de la cámara de secado y equipos auxiliares.

Las ecuaciones de diseño se presentan en forma aproximada, por lo que se suponen valores, los que se verifican posteriormente con la evaluación del equipo. La metodología de diseño consta de las siguientes etapas:

- Dimensionamiento de la cámara de secado: diámetro y altura de la cámara;
- Dimensionamiento del ciclón;
- Diseño del ventilador – extractor;
- Diseño del elemento calefactor; y,
- Dimensionamiento de la línea de transporte (tubería).

a. Dimensionamiento de la Cámara de Secado.

El dimensionamiento de la cámara de secado consiste en el cálculo del diámetro y la altura de la cámara, que garanticen que la transferencia de masa, calor y cantidad de movimiento, se realice bajo las condiciones deseadas, con el fin de obtener un producto con las características de calidad previamente establecidas (Escamilla, *et al.*, 1993).

Los datos de relación entre la altura y diámetro para la cámara de secado con respecto al tipo de atomizador se presentan en el **Cuadro 13**.

Cuadro 13. Relación entre altura y diámetro para la cámara de secado.

Cámara de secado/atomizador (combinación)	HD (altura/diámetro cámara)
Flujo en paralelo/rotatorio	0.6:1 a 1:1
Flujo paralelo / boquilla atomizadora en la cima	3:1 a 4:1
Boquilla atomizadora en contracorriente	3:1 a 5:1
Flujo mezclado (fuente) boquilla atomizadora	1:1 a 1.5:1
Flujo mezclado (lecho fluidizado)	0.15:1 a 0.4:1

FUENTE: (MASTERS K., 1991).

• Cálculo del Diámetro de la Cámara.

El diámetro a calcular es aquel que permita que la velocidad del aire caliente sea lo suficientemente pequeña para que garantice que el tiempo de residencia de las gotas para el secado sea menor que el tiempo de traslado. Una forma sencilla de calcular el diámetro de la cámara es a partir de la información del caudal total y la velocidad del aire caliente, de acuerdo a la siguiente relación sencilla: (Escamilla, *et al.*, 1993) y (Cueva, 1995).

$$A_{fcs} = \frac{\dot{Q}_{total}}{v_{cs}} \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$D_{cs} = \sqrt{\frac{4A_{fcs}}{\pi}} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{\text{aire extraído}} + \dot{Q}_{\text{vapor de agua}} \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$\dot{Q}_{\text{aire extraído}} = \frac{G}{\rho_{\text{aire}}} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$\dot{Q}_{\text{vapor de agua}} = \frac{M_{\text{evap}}}{\rho_{\text{vapor de agua}}} \quad \text{Ecuación (14)}$$

El caudal total es la suma del caudal de aire extraído y caudal de vapor de agua, se evalúa a las condiciones de salida del secador. En un secador por atomización con disco rotatorio la velocidad superficial varía en el rango que se muestra en la **Cuadro 14**.

Cuadro 14. Velocidad superficial en un Atomizador con disco rotatorio.

Diámetro de la cámara (m)	Velocidad superficial (mis)
4.0	0.15
6.5	0.35
9.0	0.55

FUENTE: (FILKOVÁ & MUJUMDAR, 1985).

Valores típicos de la velocidad superficial en secadores por atomización con tobera son mucho más grandes y varían entre 0.5 m/s a varios m/s.

- **Cálculo de la Altura de la Cámara.**

Para el cálculo de la altura del secador es necesario conocer tiempo de secado. Con la información de velocidad superficial y tiempo de secado, se calcula la altura de la cámara de secado: (Escamilla, 1993) y (Masters, 1991).

$$Z = vxt_s = H \quad \text{Ecuación (15)}$$

b. Dimensionamiento del Ciclón.

Éste es un dispositivo auxiliar, que se utiliza para separar polvo seco del aire caliente y generalmente se instala antes de un extractor. El dimensionamiento del ciclón se realiza hallando su diámetro, en función a éste se determina la configuración física (altura y demás dimensiones) (Mendoza, 1995) y (Perry & Chilton, 1973).

$$D_c = \sqrt{\frac{8 \left(\overset{\circ}{Q}_{total} \right)}{vc}} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Las expresiones que son utilizadas en este modelo son: (Espinoza & Herrera, 2003).

$$\begin{array}{lll}
 B_c = D_c / 4 & L_c = 2D_c & J_c = \text{Arbitrario} \\
 H_c = D_c / 2 & S_c = D_c / 8 & \text{usualmente} = D_c / 4 \\
 D_e = D_c / 2 & Z_c = 2D_c &
 \end{array}$$

c. Diseño del Ventilador – Extractor.

El diseño del extractor se realiza utilizando la ecuación de balance de energía mecánica en la succión y descarga del ventilador - extractor y suponiendo que el gas tiene un comportamiento como fluido incompresible (Branan, 1994).

Estos cálculos se realizaron teniendo como datos el caudal total ($\overset{\circ}{Q}_{Total}$) y la temperatura de descarga (T_{G2}).

- **Densidad en la succión:**

$$\rho_l = \overline{M} \left(\frac{T_{CN}}{T_{G2}} \right) \left(\frac{P_1}{P_{CN}} \right) \quad \text{Ecuación (17)}$$

- **Densidad en la descarga:**

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \quad \text{Ecuación (18)}$$

- **Densidad media:**

$$\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad \text{Ecuación (19)}$$

- **Balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 2:**

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + nWs = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + \sum F \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$nWs = \frac{p_1 - p_2}{\rho_m}$$

Considerando eficiencia del 60%, $n = 0,6$

$$Ws = \frac{p_1 - p_2}{\rho_m^n} \quad \text{Ecuación (21)}$$

- **Calculo de la potencia del extractor:**

$$Pot. = Ws(m) \quad \text{Ecuación (22)}$$

Donde:

$$m = \dot{Q}_{total} (\rho_m) \quad \text{Ecuación (23)}$$

- d. **Dimensionamiento de la Tubería de Transporte.**

Para el dimensionamiento de la tubería de transporte de flujo bifásico (sólido / gas) por la técnica de "rule and thumb", la velocidad recomendada del aire debe ser de 20 a 25 m/s. Valores por debajo de 20 m/s origina que las partículas sólidas se sedimenten en la tubería y no sean arrastrados (Branan, 1994).

El dimensionamiento consiste en hallar el diámetro de la tubería de transporte D_{iLT}

$$A_{LT} = \frac{\dot{Q}_{total}}{v_{LT}} \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$A_{LT} = \frac{\pi}{4} (D_{iLT})^2 \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$D_{iLT} = \sqrt{\frac{4(A_{LT})}{\pi}} \quad \text{Ecuación (26)}$$

2.6.3. Funcionamiento del secador por atomización.

El funcionamiento de un secador se evalúa en términos de eficiencia térmica del proceso y tiempo de residencia dentro de la cámara de secado (Masters, 1991).

a. Eficiencia Térmica.

Para calcular la eficiencia térmica de un secador por atomización se tiene las siguientes definiciones:

- **Eficiencia térmica máxima (caso ideal):**

$$\eta_{max} = \frac{T_{G1} - T_{sat}}{T_{G1} - T_a} \times 100\% \quad \text{Ecuación (27)}$$

- **Eficiencia térmica global:**

$$\eta_{global} = \frac{T_{G1} - T_{G2}}{T_{G1} - T_a} \times 100\%$$

Ecuación (28)

- **Eficiencia evaporativa:**

$$\eta_{evap} = \frac{T_{G1} - T_{G2}}{T_{G1} - T_{sat}} \times 100\%$$

Ecuación (29)

En el **Cuadro 15**, se muestran la eficiencia térmica en secadores por aspersión de diferentes diseños de cámaras.

Cuadro 15. Eficiencias térmicas en operaciones típicas de secado por aspersión que comprenden diferentes diseños de cámaras.

Diseño de cámara	Temperatura Entrada (°C)	Temperatura Salida (°C)	Eficiencia Térmica aprox. (%)	Tamaño medio partícula (µm)
Flujo paralelo.	200	90	60	40-100
Flujo paralelo.	500	100	82.5	40-100
Flujo contracorriente.	750	110	88	40-100
Flujo contracorriente.	350	125	68	120-200
Flujo mezclado.	350	90	80	150-350
Flujo mezclado.	220	60	78	200-1000

FUENTE: (MASTERS K., 1991).

2.6.4. Tiempo de Residencia Dentro de la Cámara de Secado.

La cámara de secado se diseña para manejar un determinado volumen de aire caliente

(Vcs) a un flujo adecuado (\dot{Q}_{total}) que permita transferir el calor necesario para secar las gotas finamente dispersas en un tiempo de residencia adecuado para alcanzar la humedad deseada.

El tiempo mínimo de residencia del producto dentro del secador puede considerarse como el tiempo medio de residencia del aire. El tiempo de residencia se calcula a partir de la siguiente relación: (Masters, 1991).

$$t_s = \frac{V_{CS}}{Q_{total}} \quad \text{Ecuación (30)}$$

Donde: V_{CS} es el volumen de la cámara

2.7. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

2.7.1. Aceros inoxidables y su clasificación.

Se conoce como aceros inoxidables a una serie de aceros resistentes a la corrosión atmosféricas, a los ácidos, alcoholes y también a la oxidación a temperaturas no muy elevadas. Estos aceros cuya composición entra el cromo (Cr), hasta en 24%, en algunos tipos. Se clasifican en tres grupos con arreglo a su constitución Aceros Martensíticos, Aceros Ferríticos, Aceros Austeníticos (Lansheras & Sanchez, 1972).

El acero inoxidable se caracteriza por el alto nivel de resistencia a la corrosión que ofrece las aleaciones de este grupo. Para ser clasificada como ACERO inoxidable, la aleación debe tener al menos 10% de contenido de Cromo. La AISI (American Iron And Steel Institute), designa casi todos los aceros inoxidables por sus series 200, 300 y 400. Los tres grupos principales de aceros inoxidables son el Austenítico, el Ferroso y el Martensítico. Los aceros Austeníticos se encuentran dentro de las series AISI 200 y 300 son grados de uso general cuya resistencia es moderada. En su mayor parte no son susceptibles al tratamiento térmico y sus propiedades finales se determinan por el grado en que trabajan (Mott, 1996).

Se tienen tres tipos de aceros inoxidables: (a) martensítico, (b) Ferrítico, (c) austenítico. Todos estos aceros poseen un diferente grado de propiedades resistentes a la corrosión, dependiendo principalmente del contenido de cromo. El acero inoxidable, en particular el tipo austenítico, su acabado es pulido y de gran lustre. Además estos aceros son muy usados para aplicaciones expuestas al calor (Deutschman *et al*, 1996).

- Aceros inoxidables Martensíticos (SERIE 400);
- Aceros inoxidables Ferríticos (SERIE 400); y,
- Aceros inoxidables Austeníticos (SERIE 300).

a. Aceros Inoxidables Martensíticos (SERIE 400).

Son la primera rama de los aceros inoxidables, llamados simplemente al Cromo y fueron los primeros desarrollados industrialmente (aplicados en cuchillería). Tiene un contenido de Carbono relativamente alto de 0.2 al 2% y de Cromo de 12 a 18%. Los tipos más comunes son el AISI 410, 420 y 431, las propiedades básicas son: Elevada dureza (se puede incrementar por tratamiento térmico) y gran facilidad de maquinado, resistencia a la corrosión moderada. Principales aplicaciones: Ejes, flechas, instrumental quirúrgico y cuchillería.

b. Aceros Inoxidables Ferríticos (SERIE 400).

También se consideran simplemente al cromo, su contenido varía de 12 al 18%, pero el contenido de Carbono es bajo 0.2%. Los tipos más comunes son el AISI 430, 409 y 434, las propiedades básicas son: Buena resistencia a la corrosión. La dureza no es muy alta y no pueden incrementarla por tratamiento térmico. Principales aplicaciones: Equipo y utensilios domésticos y en aplicaciones arquitectónicas y decorativas.

c. Aceros Inoxidables Austeníticos (SERIE 300).

Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando Níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el nombre. El contenido de Cromo varía de 16 a 18%, el Níquel de 3.5 a 22% y el de Molibdeno 1.5 a 6%. Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317.

Las propiedades básicas son: excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene – limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas. Principales aplicaciones: utensilios y equipo para uso doméstico, hospitalario y en la industria alimentaria, tanques, tuberías, etc. (Deutschman *et al*, 1996).

2.7.2. Procesos de unión.

Las conexiones de las estructuras se efectúan mediante remaches, pernos o soldadura. Para que una junta sea eficiente es preciso que alcance propiedades de resistencia equivalentes a las de las secciones o placas de las aleaciones que se han de unir con un número mínimo de remaches, pernos o filetes de soldadura. La junta tiene que hacerse rápida y efectivamente, ya sea en el sitio o en el taller, como resulten más convenientes, de manera que los miembros estructurales se construyan y ensamblen en forma económica de acuerdo con el diseño requerido (King, 1992).

a. Soldadura.

La soldadura es un proceso de coalescencia localizada de metal que se produce mediante calentamiento a temperaturas convenientes, con aplicación de presión o sin ella y con utilización de material de relleno o sin él. El material de relleno puede tener el mismo punto de fusión de los metales (Marks, 1984).

El proceso de soldadura se divide en tres grupos, soldadura por fusión, soldadura por resistencia y soldadura por presión. Los métodos de fusión, incluyen el arco protegido por gas inerte (electrodo de metal, gas inerte, el electrodo de tungsteno y gas inerte) y los métodos que utilizaban una elevada energía como haces de electrones y rayos láser (King, 1992).

- **Soldadura de arco con gas inerte (TIG).**

Es un proceso en el cual un arco eléctrico controlado es establecido entre la pieza a ser soldada (obra) y un electrodo no consumible. La región de la soldadura es protegida contra contaminaciones del medio ambiente por atmosfera gaseosa que fluye a través de la antorcha. Este calor generado del arco es concentrado y funde las partes a ser soldadas. Este proceso es conocido como soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente de tungsteno, dada la elevada resistencia a la temperatura del tungsteno funde a 3410°C (Kalpakjian & Schmid, 2004).

2.7.3. Aislación.

Los equipos para el procesamiento de alimentos se suelen aislar para minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno. Si no se aíslan, los equipos pueden tener pérdidas de calor por cualquiera de los tres mecanismos de transmisión de calor: conducción, convección o radiación. Las pérdidas de calor por conducción a través del aire serán pequeñas debido a su baja conductividad ($K_{\text{aire}} = 0.0258 \text{ w/m}\cdot\text{°C}$ a 30 °C). Las pérdidas por radiación son proporcionales a la diferencia entre las cuartas potencias de las temperaturas de la superficie del equipo y del ambiente; estas pérdidas serán pequeñas si la diferencia de temperatura es pequeña, pero pueden ser importantes al crecer esta (Singh & Heldman, 1998).

Las pérdidas de calor por convección se desarrollarán fácilmente si existe una diferencia de temperatura entre el cuerpo y su entorno. Es necesario aislar para disminuir el flujo de calor entre un objeto y sus alrededores. El material aislante debe tener baja conductividad térmica y capacidad para frenar las corrientes de convección. Los materiales más utilizados para aislar incluyen el corcho, la magnesia, el vidrio y la lana (Singh & Heldman, 1998).

CLASIFICACIÓN.

Existen muchos tipos de materiales aislantes pudiéndose clasificar de distintas formas en función de las características que se consideran, atendiendo a su origen que será la más didáctica por tanto los aislantes térmicos los dividiremos en: (ISOVER, 2012).

- Por su origen: Minerales, sintéticos y vegetales;
- Por su estructura: Pulverulentos (corcho, diatomeas, kieselguhr, perlitas, vermiculitas), Fibrosos (Fibra de vidrio, lanas minerales, lanas de escoria, animales y vegetales), espumas (de origen mineral como los hormigones celulares; de origen sintético, con células abiertas y cerradas; y los aglomerantes); y,
- Por su temperatura: Refractarios (más de 800 °C), semirrefractarios (fibras cerámicas). Ordinarios (menos de 800 °C).

a. Lana de vidrio.

Un material aislante se caracteriza por el valor de su conductividad térmica; su poder aislante es tanto más elevado cuanto más pequeña es su conductividad (ISOVER, 2012).

La lana de vidrio es un material compuesto. El fieltro, que se forma en la cadena, está constituido por fibras entrecruzadas desordenadamente, que impiden las corrientes de convección del aire (ISOVER, 2012).

b. Lana de Roca.

Otro tipo de lana mineral es la denominada “lana de roca”, elaborada a partir de rocas diabásicas (rocas basálticas), obteniéndose un producto de propiedades complementarias a la lana de vidrio. Es un producto especialmente indicado para aislamiento térmico en la industria (altas temperaturas) (ISOVER, 2012).

En el **Cuadro 16**; se muestran las temperaturas de empleo de distintos materiales aislantes.

Cuadro 16. Comparación de temperaturas máximas de empleo de distintos materiales aislantes.

Minerales	Plásticos
<p>Lana de vidrio</p> <ul style="list-style-type: none"> • Con encolado, 250 °C • Sin encolado, 500 °C <p>Lana de roca</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hasta 750 °C <p>Fibra ceramica</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hasta 1.500 °C 	<p>Poliestireno</p> <ul style="list-style-type: none"> • Expandido, 70 °C • Extrusionado, 85 °C <p>Poliuretano</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100 °C

FUENTE: (ISOVER, 2012).

III. MATERIALES y MÉTODOS.

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN.

El presente trabajo de investigación se realizó en:

La construcción y ensamble del equipo se llevó a cabo en la Empresa Industrial “Maquinarias DC”, Construcción de Maquinas Agroindustriales para frio y calor, ubicado en La Rinconada San Apolinar Mz-F, L-2 en la ciudad de Juliaca, Provincia de San Román. Las pruebas preliminares de funcionamiento y ajuste del equipo se realizaron en la misma Empresa.

La evaluación del equipo con la obtención de leche en polvo, se realizó en la Universidad Nacional del Altiplano Puno en la planta piloto de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, de la facultad de Ciencias Agrarias.

El análisis de la materia prima y producto final: en el laboratorio de Pastas y Harinas de la carrera profesional de Ingeniería Agroindustrial y en el laboratorio de Pastos y Forrajes del INIA-Salcedo.

3.2. MATERIA PRIMA.

Para estudiar el funcionamiento del equipo se utilizaron las siguientes muestras:

- Agua pura (destilada) como fluido Newtoniano.
- Leche en entera en polvo (reconstituida).

3.3. EQUIPOS DE CONTROL PARA LAS PRUEBAS DE SECADO.

- Balanza determinadora de humedad H.W. Kessel S.A.;
- Compresor Campbell Hausfeld 1.5 HP de 6 galones;
- Higrómetro Digital Taylor;
- Equipo de Rop-Tap con juego de mallas para análisis de distribución de tamaño de partículas;
- Balanza analítica digital Sartorius AG Gottingen Germany (0.001 a 320 g);
- Termómetro Digital;
- Cronometro CASIO; y,

- Hornilla eléctrica, un recipiente de acero inoxidable para preparar la solución, vasos precipitados de 250 y 500 *ml*.

3.4. MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO POR ATOMIZACIÓN.

- Plancha de acero inoxidable de 2.5 *mm* de espesor (AISI 304 acabado 2B);
- Plancha de acero inoxidable de 2.0 *mm* de espesor (AISI 304 L);
- Tubo 2" x 1.5*m* -304-2B;
- Codos de 30 ° y 90°, de acero inoxidable de 2" x 1.5*m* -304-2B;
- Pistola Aerográfica;
- Varilla de tubo cuadrado 1 ½ x 2 *m*-304;
- Varilla de tubo cuadrado de 1 x1.2 x 304;
- Motor de 1/2 HP, Monofásico;
- Selenoide;
- Pirómetro digital con rango de 0 – 400°C Autonics TZN4S;
- Termocupla Tipo J TZN4S;
- Pirómetro digital con rango de 0 – 200°C Estronger;
- Termocupla Tipo J Estronger;
- Manómetro de ½" dial DP1SPSJ de 0 a 100 *psi*. WIKA;
- Regulador de presión;
- Quemador;
- Tubos de fierro estructural de 12 *mm* de diámetro;
- Válvulas de servicio;
- Manómetro de ½" dial DP1SPSJ de 0 a 100 *psi*. WIKA;
- Recirculador Ventilador centrifugo;
- Tuercas, Pernos, Tornillos de acero Inoxidable y galvanizado;
- Caja de Tablero de control;
- Acoples, Contactores magnéticos, Interruptores y Pulsadores;
- Acoples para tablero;
- Varillas para soldaduras cellecor;
- Silicona de alta temperatura;
- Lana de roca mineral;

- Electrodo de soldadura;
- Mangueras de presión;
- Manguera de gas;
- Tubo en “T” de paso de gas;
- Abrazaderas de acero inoxidable;
- Tuberías de cobre;
- Cable AWG N°14;
- Cable doble lindado N°12; y,
- Solución de OXINOL para limpieza.

3.5. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR POR ATOMIZACIÓN.

a. Equipos:

- Soldadura Eléctrica FERR-1800 TURBO;
- Soldadura Autógena;
- Soldadura TIG INVERTING VRD 130;
- Torno;
- Roladora de planchas;
- Esmeril eléctrico BOSCH GSM 175;
- Taladro INDURA T13 1050; y,
- Amperímetro BNTEK DT 8308.

b. Herramientas:

- Caja de argón;
- Alicates, desarmadores varios;
- Juego de brocas;
- Pulidor de acero;
- Doblador de tubos; y,
- Otras herramientas utilizadas.

3.6. MÉTODO DE ANÁLISIS.

3.6.1. Análisis fisicoquímico de la materia prima y producto final.

Se evaluaron las características fisicoquímicas de la materia prima, y el producto final obtenido en el proceso de secado, para luego realizar su comparación en cuanto a estas características.

a. Determinación del contenido de humedad.

Para la determinar el Contenido de Humedad del producto obtenido de cada uno de los ensayos realizados en el desarrollo de este proyecto se utilizó una balanza determinadora de humedad marca H.W. Kessel S.A. del laboratorio de Procesamiento de productos Agropecuarios de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial. El cual se muestra en la **Figura 15**.

Figura 15. Balanza determinadora de Humedad.



Fundamento:

La pérdida de agua en la muestra se produce por la acción de calor.

Procedimiento:

Los parámetros fijados en el equipo para realizar los ensayos fueron:

- Temperatura : 120 °C
- Intervalo : 10 min

Se pesó 2 g de muestra en el platillo del equipo previamente tarado (repartida de forma homogénea). Una vez cerrado el equipo se procedió a la determinación de humedad durante 10 *min*, obteniéndose en forma directa el porcentaje de humedad.

b. Análisis químico proximal.

Se realizó en el Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA donde se emplearon los siguientes métodos. Recomendados por la AOC (1993).

- Determinación de Proteínas Método Kjeldahl (F.C. 6.38);
- Determinación de Grasa Método Gravimétrico;
- Determinación de Cenizas Método Gravimétrico;
- Determinación de Acidez Método Volumétrico; y,
- Determinación de carbohidratos (AOC, 1993).

3.7. MÉTODO DE ANÁLISIS DEL PRODUCTO FINAL.

3.7.1. Tamaño de partícula (Granulometría).

Equipo empleado: Juego de tamices marca RO TAP de varios micrajes, el cual se muestra en la **Figura 16**.

Figura 16. Equipo de Tamizado.



Procedimiento:

Se pesó 100 g de muestra y se distribuyó en el primer tamiz de malla superior N° 30, seguida de las mallas N° 45, 50 y 70 y se colocaron en el equipo. La operación se

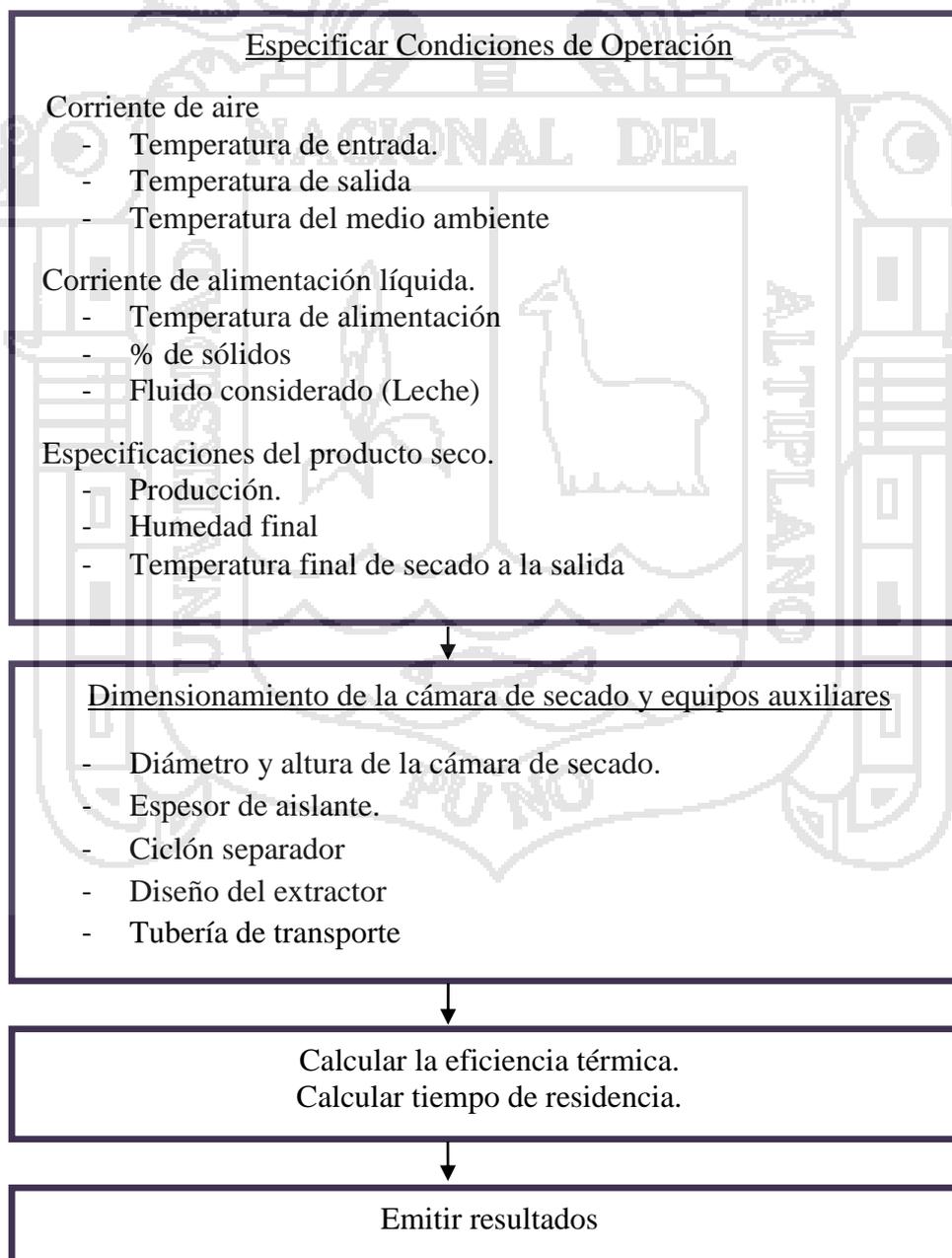
hizo en el equipo de tamizado durante 10 *min*, al final del cual se pesó la cantidad de material retenido, en cada uno de los tamices y se determinó así, los porcentajes de retención.

3.8. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL EQUIPO.

3.8.1. Construcción del equipo de secado por atomización a nivel de laboratorio.

a. Metodología de Diseño para el secador por atomización a nivel de laboratorio.

Cuadro 17. Resumen de metodología de Diseño del equipo de secado.



El equipo de Secado por Atomización a nivel de laboratorio, se diseñó siguiendo el principio de transferencia de masa y calor global para la obtención de leche en polvo por convección forzada en un sistema de secado a co-corriente de flujo de aire caliente y con una cantidad de producto seco a producir de 1.5 kg/h (propuesto), juntamente con la humedad final requerida como límite máximo (5%). Además para fines de cálculo, se fijó un porcentaje inicial de sólidos en la alimentación (mínimo 20%).

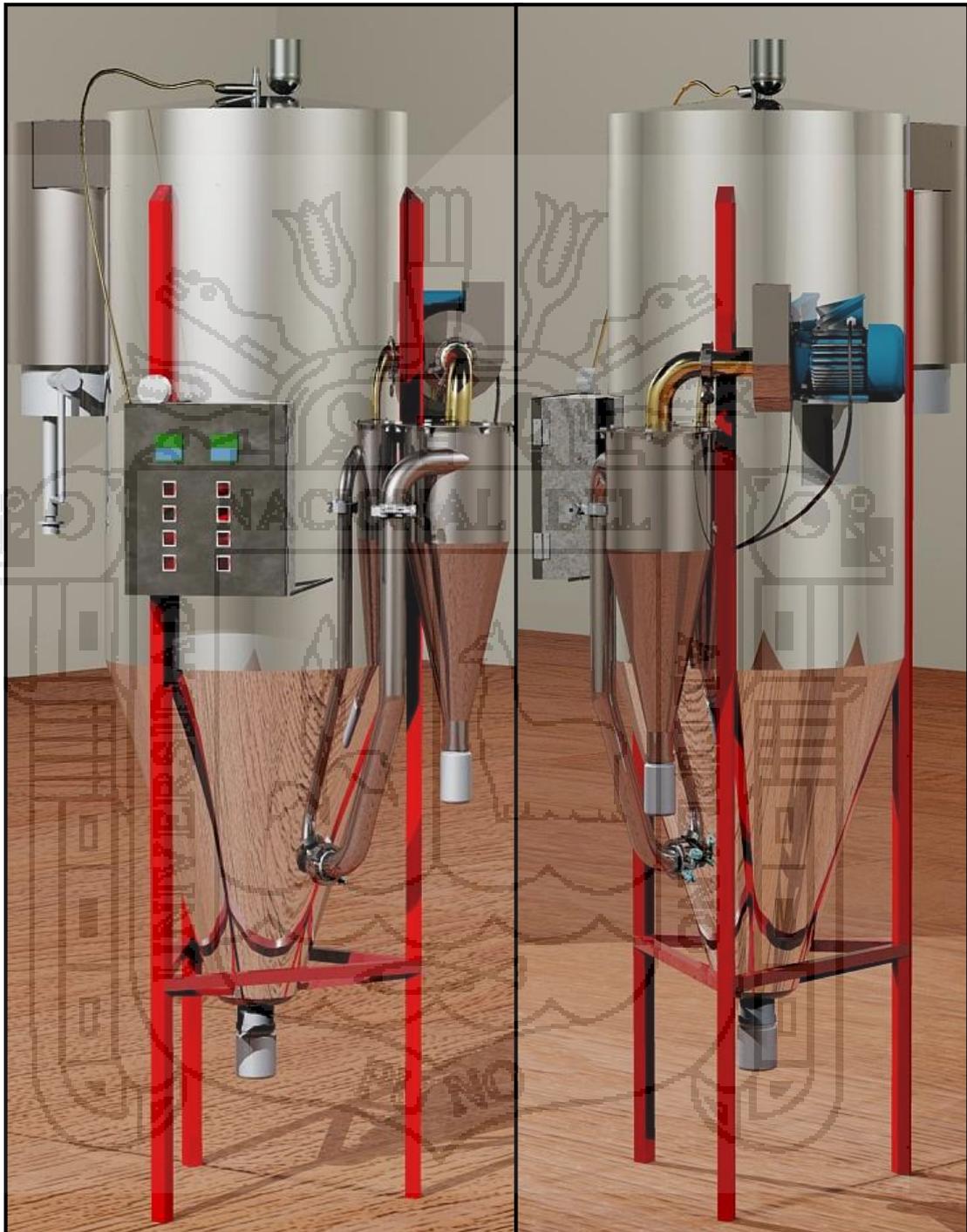
Con el desarrollo del balance de masa y energía se calculó la cantidad de energía requerida para producir la evaporación de agua a las condiciones de operación del sistema, para luego determinar la cantidad de calor necesario para llevar a cabo la operación en función a los calores sensibles de sólido y agua no evaporada. Conociendo el calor total necesario y las temperaturas de entrada y salida del aire de la cámara, se calculó el flujo de masa de aire requerido.

Con la ayuda de los cálculos de balance de masa y energía, se permitió determinar: Flujo de alimentación ($F = 7.125 \text{ kg/h}$), flujo de aire requerido para el secador ($G = 159.81 \text{ kg aire seco/h}$) para las especificaciones del ventilador y la cantidad de calor total requerido para las especificaciones del calefactor a gas ($Q_r = 10,0 \text{ kW}$).

Las ecuaciones de diseño para el dimensionamiento de la cámara y equipos auxiliares se presentan en forma aproximada, por lo que se plantearon valores (según la bibliografía), los que se verificaron posteriormente con la evaluación del equipo. Luego se realizó la elaboración de planos correspondientes y finalmente se procedió a la construcción del equipo. Los cálculos de todas las dimensiones y características para todas las partes del equipo, se encuentran en los **Anexos 3 y 4**, así mismo los planos del equipo completo elaborados con el programa AUTOCAD se muestran en el **Anexo 10**.

A continuación de muestra en la **Figura 17**. La imagen del diseño del equipo en 3D.

Figura 17. Diseño del equipo en 3D.



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Los aspectos más importantes sobre el diseño y construcción del equipo fueron:

- Balance de Masa y Energía.
- Tipo de atomizador y flujo de aire. (Tobera de neumática y Flujo paralelo)
- Dimensiones de la cámara de secado (altura y diámetro) y equipos auxiliares.
- Espesor de aislante
- Elaboración de planos y detalles constructivos de las partes que conforman el equipo elaborados con el programa AUTOCAD.
- Selección de materiales.
- Tipo de construcción esto es: Trazado y Cortado, Conformado, plegado y curvado, Unión (forjado, soldado y remachado).
- Pruebas de unión, limpieza de óxidos y pulido del equipo.
- Montaje del equipo.
- Instrumentación (sistema de control adoptado).

b. De la cámara de secado.

Para el diseño de la cámara de secado, se utilizaron las ecuaciones descritas en la bibliografía por Escanilla, (1993) y Cueva, (1995).

Las dimensiones de la cámara de secado (diámetro y altura) fueron calculados a partir de la información de caudal total, tiempo de secado (se planteó 4 s) y una velocidad del aire caliente (se planteó 0.4 m/s) lo suficientemente pequeña que garantice que el tiempo de residencia de las gotas para el secado sea menor que el tiempo de traslado.

Así mismo se consideró la relación 3:1 de altura y diámetro para la cámara de secado para un flujo de paralelo y tobera de dos fluidos, descrita en Masters, (1991) la que determina que la cámara sea de forma alargada. Para evitar las pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de secado, se determinó el espesor del aislante tomando las fórmulas de Pilligua (2006). Descritas en el **Anexo 4**.

c. Equipos auxiliares.

- **CALEFACTOR DE AIRE.**

Como elemento calefactor de aire, para este trabajo se eligió el de gas licuado directo, el que se diseñó tomando en cuenta la cantidad de calor necesario obtenido en el balance de energía, para lograr un calentamiento de aire desde 20 °C (temperatura ambiente del aire) hasta 200 °C para facilitar la evaluación a diferentes temperaturas de secado. Se determinó un espesor de 3 *cm* de aislante de roca mineral, para evitar la pérdida de calor al medio ambiente y mejorar su rendimiento.

- **SISTEMA DE ATOMIZACIÓN.**

Se seleccionó el tipo de secador por atomización con tobera neumática (de dos fluidos) con mezcla externa y de flujo co-corriente, debido a que el fluido se alimenta por gravedad y por la ventaja de atomizar fluidos viscosos o fluidos que contienen sólidos sin problemas de obstrucción por ser el diámetro del orificio relativamente grande, mayor a 1 *mm*. Debido a la escasez de bibliografía con respecto a la formación de los conos de nebulización, en este caso las dimensiones ideales fueron obtenidas por tentativa y error, usándose técnicas fotográficas y mediciones en escala real. Esto con el fin de comparar el diámetro y altura de la cámara de secado calculado anteriormente.

- **CICLÓN SEPARADOR DE POLVO.**

El dimensionamiento del ciclón se realizó hallando su diámetro, en función a éste se determina la configuración física (altura y demás dimensiones). Para el diseño del ciclón la bibliografía recomienda una velocidad de entrada del aire entre 6-24 *m/s*, se planteó una $v_c = 14 \text{ m/s}$ lo cual produce una caída de presión de 130 *mmH₂O*. Para el diseño del ciclón se empleó el modelo para un ciclón de aceleración centrifuga propuesto por Espinoza y Herrera, (2003). Descritas en el **Anexo 4**.

- **EXTRACTOR DE AIRE.**

El diseño del extractor se realizó utilizando la ecuación de balance y energía mecánica en la succión y descarga del ventilador – extractor y suponiendo que el gas tiene un comportamiento como fluido incompresible. La caída de presión permisible

a la entrada y salida del ventilador es de $P=28 \text{ mmHg}$, siendo la presión en la succión $P_1=534 \text{ mmHg}$ y presión en la descarga $P_2=562 \text{ mmHg}$. La carga total considerada para el equipo fue de 230 mmHg de columna de agua, en esta se considera la pérdida de carga en el extractor, tubería de transporte y el ciclón.

Se consideró una eficiencia de 60% ($\eta=0.6$) para este equipo auxiliar, con el cual se calculó la potencia requerida (Pot. $\frac{1}{2}$ HP) para que extraiga el aire caliente con las partículas de polvo secado de la cámara de secado. Estos cálculos se realizaron teniendo como datos el caudal total (\dot{Q}_{total}) y la temperatura de descarga ($T_{G2} = 91 \text{ }^\circ\text{C}$).

- **TUBERÍA DE TRANSPORTE.**

Para el dimensionamiento de la tubería de transporte de flujo bifásico (sólido/gas), por la técnica “rule and thumb”, la velocidad recomendada del aire debe ser de 20-25 m/s. Valores por debajo de 20 m/s origina que las partículas sólidas se sedimenten en la tubería y no sean arrastrados. Para el presente trabajo se propuso una velocidad de aire de $v_{LT} = 22 \text{ m/s}$ y se tomó el dato de caudal de aire (\dot{Q}_{total}), el dimensionamiento consistió en hallar el diámetro de la tubería de transporte (D_{iLT}). El cual se determinó de $2 \text{ pulg} = 50 \text{ mm OD}$.

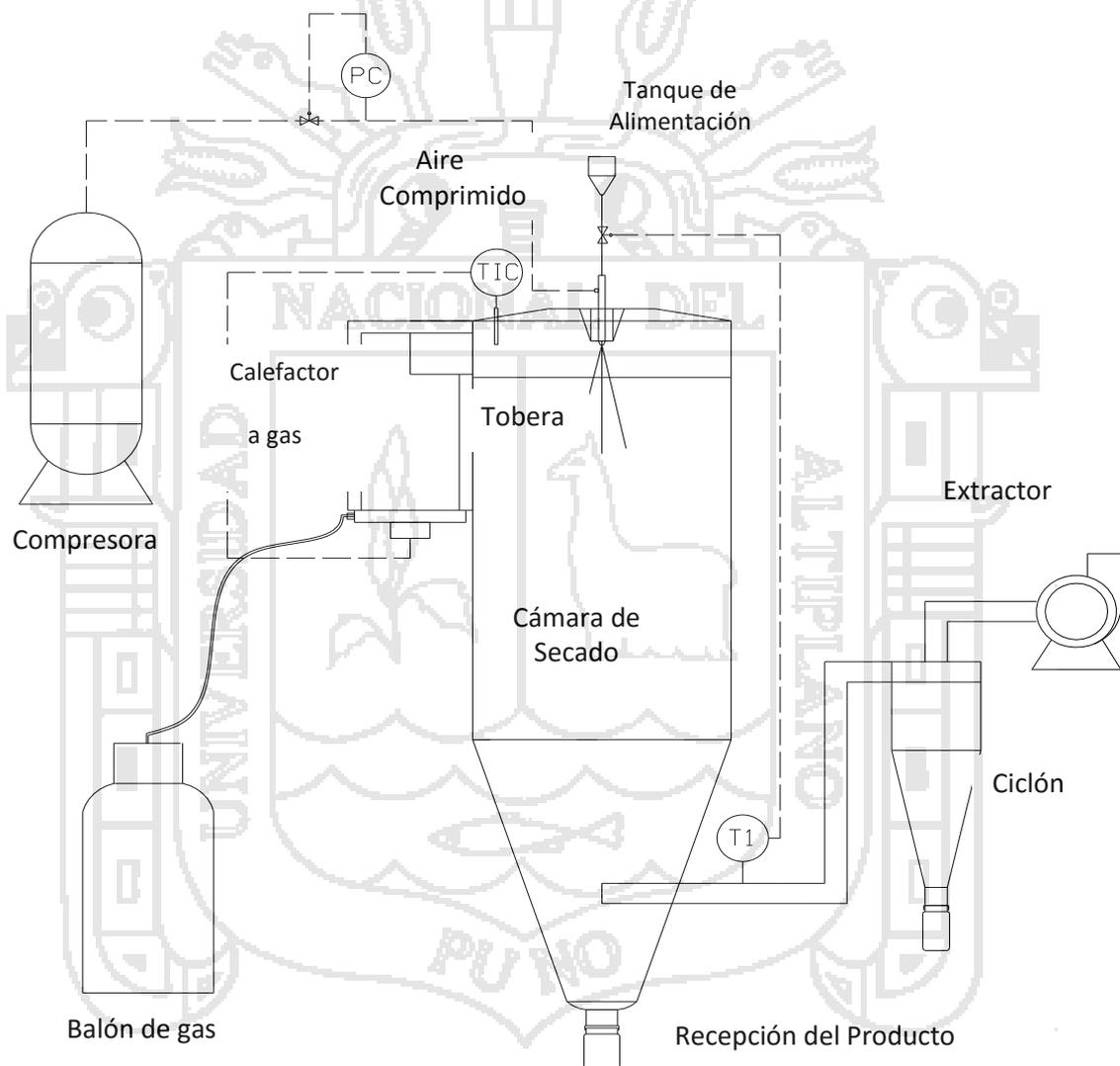
d. Montaje del equipo de secado por atomización.

Concluida la construcción de cada uno de los dispositivos auxiliares, a continuación se procedió al montaje, acoplado dichos dispositivos al equipo principal constituido por la cámara de secado. Dicho montaje se realizó en una estructura metálica, construida en barras de hierro y soldadas a la cámara de secado. El acoplamiento se realiza a través de tuberías, bridas con empaques, (que cumple la función de separar el polvo del aire). Para efectos de limpieza después de cada proceso de producción, todas las partes del equipo son desmontables.

e. Etapa final de construcción: instrumentación.

Con todo el equipo principal ya montado, se instaló en la etapa final el panel de control con los instrumentos para evitar que se dañen. Para el presente trabajo se adoptó el sistema mostrado en la **Figura 18**.

Figura 18. Sistema de control adoptado para el equipo de secado por atomización con tobera neumática.



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

f. Rendimiento de proceso.

Con los balances de materia en base seca se calcularon los rendimientos para cada uno de los ensayos realizados. Se calcularon los rendimientos en base seca para el proceso completo y para el secador.

El rendimiento se calculó según la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\text{Producto Final (base seca)}}{\text{Materia Prima (base seca)}} \times 100 \quad \text{Ecuación (31)}$$

3.8.2. Evaluación de los parámetros de secado.

Para la evaluación de la obtención de leche en polvo en el equipo de secado por atomización de laboratorio se empleó el Diseño Completo al Azar (DCA) con arreglo factorial 2 x 3 con 3 repeticiones por tratamiento, y con un nivel de significancia de $\alpha=0.01$ así mismo se efectuaron comparaciones múltiples de TUKEY para obtener los mejores tratamientos.

En el presente trabajo de investigación fueron consideradas dos variables independientes, la Temperatura de alimentación y Concentración de alimentación, que influyen de maneras diferentes en el resultado. Como variable dependiente, fue considerado el % de humedad y el % rendimiento del proceso de obtención de leche en polvo.

FACTORES EN ESTUDIO.

- Temperatura de alimentación. (TA)
TA₁: 20 (°C)
TA₂: 30 (°C)
- Concentración de alimentación. (CA)
CA₁: 25 %
CA₂: 30 %
CA₃: 35 %

CONSTANTES.

- Temperatura de entrada de aire 160 (°C)
- Presión de Atomización 35 (Psi)
- Caudal de aspiración 150 m³/h

VARIABLES DE RESPUESTA.

- Humedad del producto (%)
- Rendimiento del proceso (%) (en base seca)

El modelo Diseño Completamente al Azar, es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} : Es la variable respuesta.

μ : Es la media global.

α_i : Efecto del i-esimo nivel del factor A

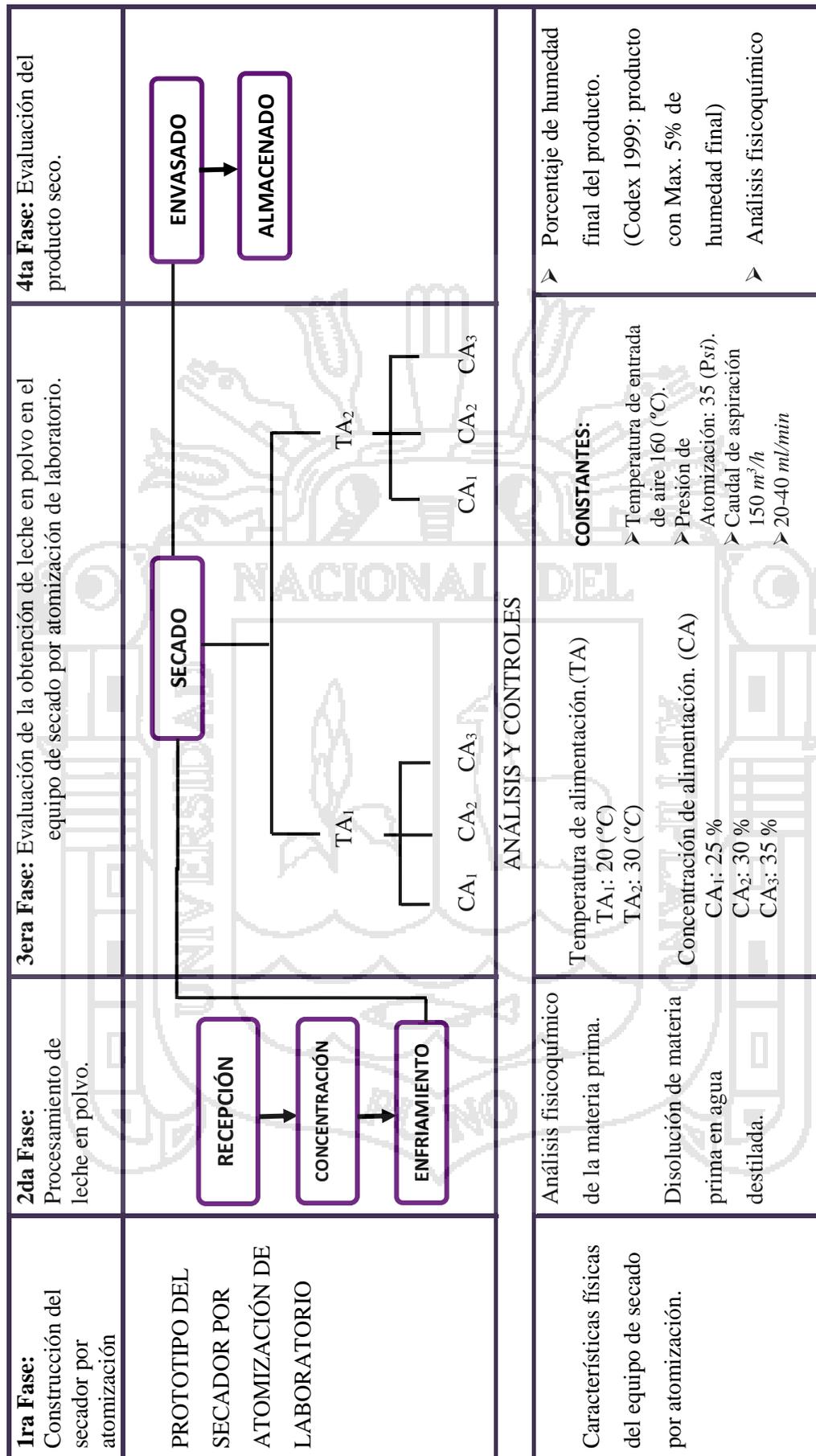
β_j : Efecto de la j-esimo nivel del factor B

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción del i-esimo nivel del factor A con el j-esimo nivel del factor B

e_{ijk} : Efecto del error experimental.

La evaluación se realizó de acuerdo al Diagrama Experimental de Operaciones, que se describe en la **Figura 19**, que muestra la secuencia de operaciones del proceso experimental.

Figura 19. Diagrama Experimental de Operaciones.

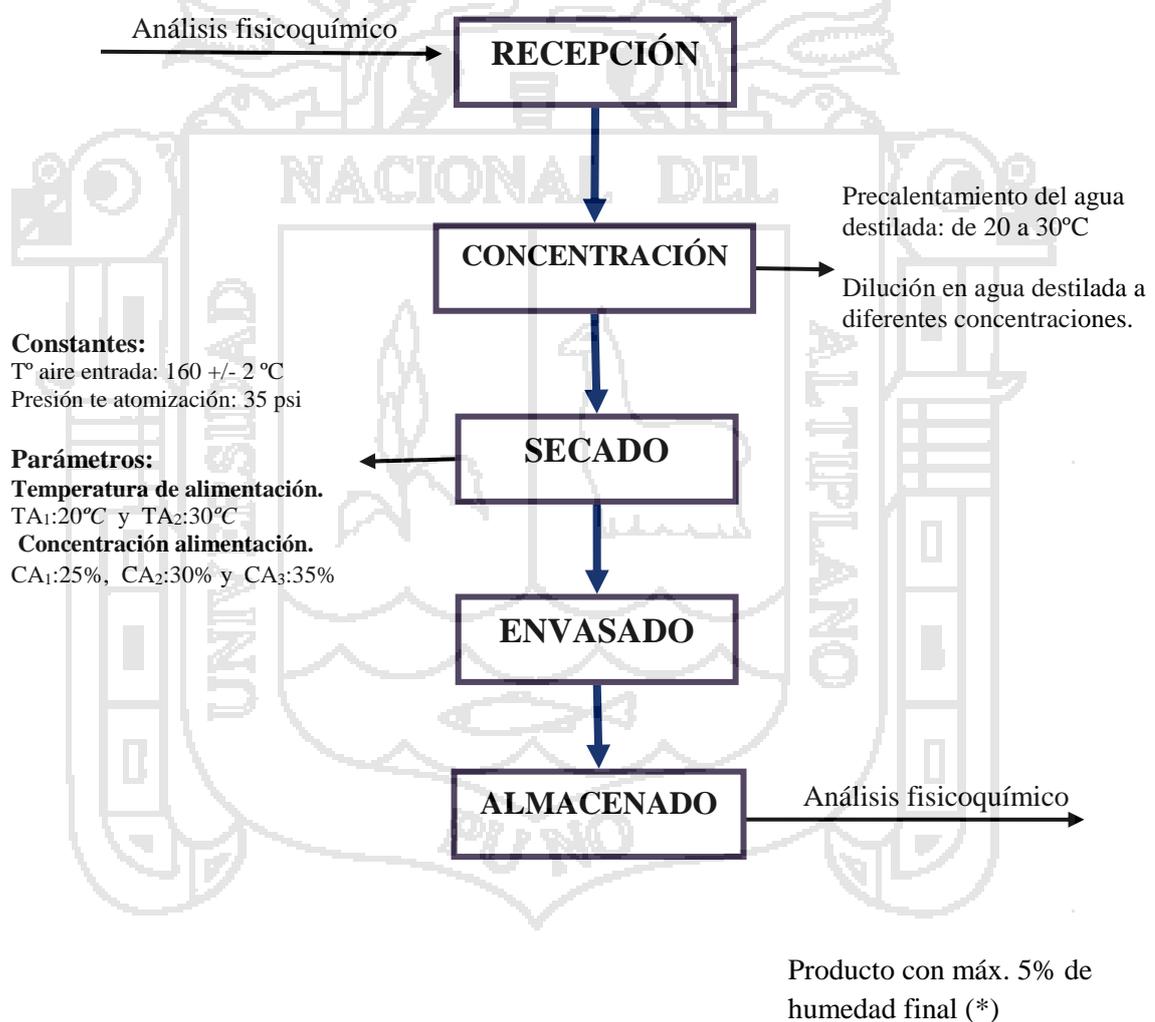


FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.8.3. Obtención de leche en polvo.

A continuación se detallan las descripciones de las operaciones unitarias para la obtención de leche en polvo. En este trabajo se usó leche entera en polvo reconstituida, para la evaluación el funcionamiento del equipo y la comparación de esta materia prima con el producto obtenido en el equipo, siguiendo el flujograma que muestra la **Figura 20**.

Figura 20. Diagrama de flujo del proceso de obtención de leche en polvo para la evaluación del equipo.



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

a. Materia prima.

Como materia prima se utilizó la leche entera en polvo, presentando uniformidad, en la coloración y estandarizado. Se le determinó sus características fisicoquímicas.

b. Concentración (acondicionamiento de la solución).

Recepcionada, pesada y analizada la materia prima (leche entera en polvo), se procedió a su dilución en agua destilada (de 30°C) a los respectivos porcentajes de concentración para su evaluación.

c. Secado (atomización).

El producto entró al equipo de atomización en forma de suspensión líquida, donde se controlaron los parámetros de presión 35 *Psi* (constante) y temperatura de 160 \pm 2 °C (constante), y las variables de evaluación (Temperatura y concentración de alimentación), para obtener luego del proceso un producto tipo polvo con diferentes porcentajes de humedad. Las instrucciones de uso del equipo de secado, se muestran en el **Anexo 7**.

d. Envasado.

Se procedió a pesar (en balanza electrónica) y envasar el producto; en envases aluminizados (Alupol), para mantener el producto seco y conservar las características propias de la leche en polvo.

e. Almacenado (control de producto terminado).

Se realizó controles fisicoquímicos y físicos de la de las muestras más representativas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

4.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL EQUIPO.

4.1.1. Cámara de secado.

La cámara de secado se compone de un cilindro y una parte cónica ambas de acero inoxidable de calidad SS-304 de altura total 1.70 m y diámetro (interior) de 0.5 m, a través del cual se llevan a cabo el flujo de las corrientes (paralelo o co-corriente) y de intercambio de calor y de masa al mismo tiempo, para eliminar la humedad del líquido que está siendo atomizado dentro. La cubierta de la cámara es de acero inoxidable 304 (**Figura 21**).

La forma alargada de la cámara de secado es debido al tipo de atomizador utilizado (tobera neumática de dos fluidos), pues el resultado de la nebulización de gotas y un atomizado en forma de cono cerrado.

Lleva una tapa de forma cilíndrica que contiene: en la cima el dispositivo atomizador, el calefactor de aire caliente con la entrada de este en forma tangencial, y un dispersor de aire que se encuentra junto al atomizador, con el objetivo de que las partículas atomizadas en la cámara tengan un mayor tiempo de viaje. Esta tapa se desplaza dejando ver el interior de la cámara y el dispositivo atomizador. Este sistema se acondiciono con el fin de realizar una mejor limpieza del equipo después de cualquier proceso.

Para evitar las pérdidas de calor a través de las paredes, la cámara de secado y la tapa cilíndrica cuentan con 4 cm de espesor de aislante de lana de roca mineral.

Figura 21. Cámara de secado.



4.1.2. Equipos auxiliares.

a. Calefactor de aire.

Este equipo consta de calefactor de aire a gas propano directo. Según Westergaar, (2004) en este tipo de calefactor el costo de operación es menor en comparación al eléctrico y por ser el más viable a nivel de planta piloto o de laboratorio. El sistema calefactor diseñado y construido es una cámara tubular de plancha de acero inoxidable SS-304 de altura 44 *cm* y diámetro 22 *cm*. Este calefactor cuenta con un quemador, que proporciona el calor necesario para elevar la temperatura del aire con un máximo de 350°C. Externamente se halla protegido con un espesor de 3 *cm* de aislante de roca mineral, para evitar la pérdida de calor al medio ambiente y mejorar su rendimiento (**Figura 22**).

Figura 22. Calefactor de aire.



b. Sistema de atomización.

El atomizador neumático está constituido de manera que el cono formado durante la nebulización fuese estrecho, evitando que las partículas no lleguen directamente a las paredes de la cámara de secado (**Figura 23**). Este tipo de dispositivo proporciona el grado más fino de atomización para una capacidad de presión dada, por lo que el grado de atomización depende de la capacidad del compresor a utilizar. Para la evaluación del equipo se utilizó el compresor de 1.5 *hp*. De los ensayos experimentales se determinó una presión de atomización de 35 *psi*, con lo cual se logró obtener gotas de tamaño relativamente pequeñas. Las características de la tobera neumática empleada en el secador por atomización son las siguientes:

- Ingreso de aire por el lado anular del tubo externo e interno.
- Ingreso del líquido o solución por el diámetro interior (2 *mm*) del tubo interno.
- Orificio para la salida de la solución alimentada: 1 *mm*
- Ángulo de atomización de las solución 30°

Figura 23. Tobera de Atomización.



c. Ciclón separador de polvo.

El tipo de ciclón construido es el de flujo inverso con un diámetro 18 cm de la que derivan en resto de las dimensiones (**Figura 24**). Según Koch y Licht, (1977) este tipo es el más usado, donde el gas sale a través de un tubo central en el mismo extremo de la entrada tangencial, la tubería del gas de salida se extiende axialmente hacia el cuerpo, el sólido es descargado a través de un orificio central en la cumbre de la sección cónica. La recolección de polvo se realiza en dos puntos; debajo de la cámara de secado y debajo del ciclón.

Figura 24. Ciclón separador de polvo.



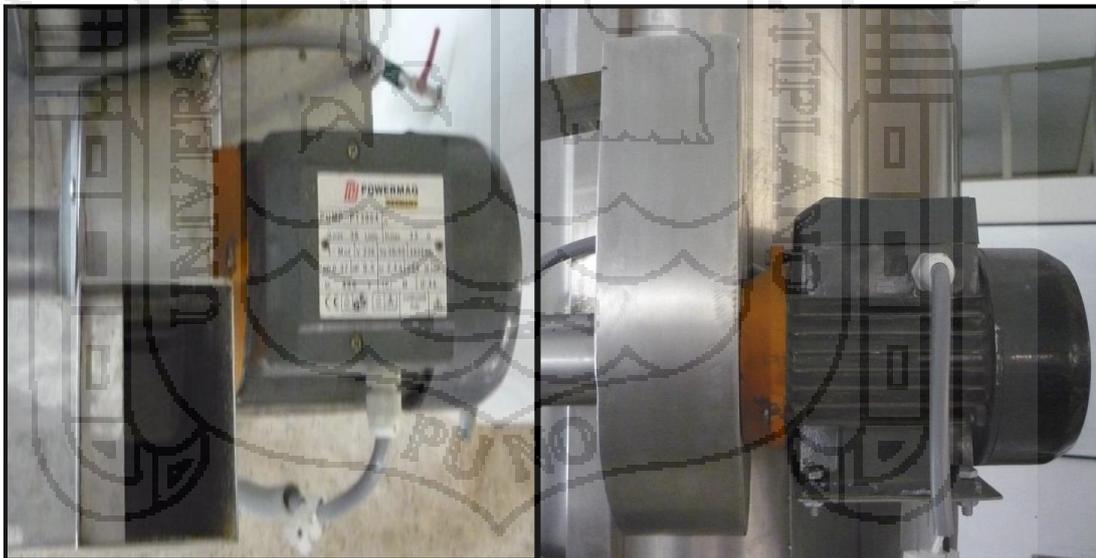
d. Extractor de aire.

El sistema de ventilación que se emplea para el siguiente trabajo, es el de un ventilador, que opera a una presión negativa y está instalado después del ciclón. (Figura 25) La presión de operación en la cámara de secado determina la cantidad de polvo en el aire evacuado, y por lo tanto, la capacidad del ciclón y su eficiencia de recolección. Mott, (1996) menciona que, los ventiladores de aspa radial tienen muchas aplicaciones en la industria para proporcionar grandes volúmenes de aire a presiones moderadas para torres de secado. En los ensayos se observó que el equipo funciona satisfactoriamente.

Las características del ventilador instalado son:

- Potencia del motor $\frac{1}{2}$ Hp
- N° de revoluciones: 3500 R.P.M.
- Caudal de aire $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (según cálculos)
- Ventilador instalado después del separador ciclón.

Figura 25. Ventilador-Extractor.



c. Tubería de transporte.

El diámetro de la tubería de transporte (D_{iLT}) es de $2 \text{ pulg} = 50 \text{ mm OD}$, unidas con bridas y empaques para cumplir la función de separar el polvo del aire y para efectos de limpieza debido a que toda la tubería es desmontable (Figura 26).

Figura 26. Tubería de transporte.



4.1.3. Instrumentación.

La parte eléctrica, básicamente consiste en el suministro de la energía eléctrica monofásica de 220 voltios de la fuente hacia el tablero, donde se distribuye para la llave general, controlador-indicador de temperatura, indicador digital de temperatura y el ventilador. Los instrumentos se instalan en la parte frontal del tablero para visualizar mejor y leer las diferentes condiciones de operación durante el proceso de secado. La temperatura de salida de aire caliente se controla variando el flujo de alimentación (realizada por gravedad), el flujo es regulado manualmente a través de una válvula. Así mismo, se controla la temperatura de entrada de aire caliente con un controlador-indicador de temperatura ayudado de una válvula Selenoide de paso de gas, para que apague y encienda el quemador a gas del calefactor al llegar a la temperatura deseada. Además hay la necesidad de controlar la presión de atomización del aire en la tobera, este control se realiza fijando una presión determinada (set point) según sea el caso, a través de un dispositivo regulador de presión. Por lo tanto el equipo cuenta como controles:

- El control de temperatura de aire a la salida regulando la razón de alimentación a la cámara;
- Control indirecto de la temperatura del aire de entrada por regulación del calentador de aire y flujo de alimentación; y,
- Control de la Presión de atomización del aire de la Tobera.

En la **Figura 27**, se muestra el equipo de secado por atomización construido e instalado, con sus equipos auxiliares y tablero de control.

Figura 27. Equipo de secado por atomización.



4.1.4. Funcionamiento del equipo de secado.

La operación se inicia encendiendo el piloto y luego en el tablero de control de temperatura de entrada, temperatura de salida, el calefactor, y el extractor. Se procede a registrar cada minuto la evolución de la temperatura del aire a la entrada y a la salida (antes del Ciclón) de la cámara de secado. Se alcanza el régimen estacionario en 12 *min* y para esta condición, se tiene una temperatura de entrada de aire de 160°C y 80 °C a la salida de la cámara de secado. A continuación se abre la válvula de aire comprimido a una presión de 35 *psi* y luego se procede a alimentar la solución por gravedad. El flujo del líquido es en dirección axial, con un flujo controlado (dependiendo de la concentración) mediante una válvula. A la salida del secador, se controla la humedad del producto seco en forma indirecta mediante la temperatura del aire (80 °C), cuyo valor es menor a 90 °C, temperatura que se mantiene dentro del rango regulando manualmente la T° entrada de aire caliente.

La operación se finaliza con el término de la alimentación de la solución, procediéndose luego con la interrupción del calefactor, se corta la entrada de aire comprimido y luego de unos minutos se apaga el ventilador, cortando en seguida el suministro de energía. Una vez enfriado el equipo, se retira el producto recolectado en los recipientes de vidrio instalados en la base cónica de la cámara y en el fondo del ciclón, así mismo de la tubería de transporte, la muestra se pesa conjuntamente con parte del polvo que ha quedado adherida en la cámara de secado para determinar su rendimiento. El producto en polvo seco se somete a un análisis granulométrico y se determina su humedad.

De los resultados, se observa que la cámara de secado alcanza una temperatura de estabilización (estado estacionario) a los 12 *min*, tiempo en el que permanece constante la temperatura de entrada y salida del aire de la cámara de secado, lo que produce una $\Delta T = (160-80 \text{ }^\circ\text{C})$ de 80 °C temperatura de entrada menos temperatura de salida, esta diferencia, determina el flujo de entrada de aire para una cámara de secado con aislamiento térmico. Se debe tomar en cuenta las instrucciones de uso del equipo, para evitar problemas en su funcionamiento; que se encuentra en el **Anexo 7**.

4.2. EVALUACIÓN DEL EQUIPO EN LA OBTENCIÓN DE LECHE EN POLVO.

4.2.1. Evaluación de la materia prima.

En el presente trabajo de investigación se utilizó leche entera en polvo, por determinarla más uniforme en su constitución y función de manejo para ser reconstituida a diferentes concentraciones. Se diluyó la materia prima en agua destilada según los parámetros deseados de concentración para la fase experimental del equipo.

En el **Cuadro 18**, se presentan los datos de las características fisicoquímicas de la leche entera en polvo antes su reconstitución en agua destilada.

Cuadro 18. Características fisicoquímicas de la Materia Prima (leche entera en polvo).

CARACTERÍSTICAS	LEP (Materia prima)
Humedad (%)	5
Proteínas (%)	26.20
Grasa (%)	27.50
Carbohidratos (%)	45.11
Energía (Kcal/100g)	532.76
Fibra (%)	-
Cenizas (%)	-
Acidez %	0.04
Impurezas macroscópicas %	0.00

FUENTE: LABORATORIO DE ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE INIA, ILLPA-PUNO.

Según las normas de CODEX 1999 el contenido de proteínas mínimo para la LEP es de 34% y en grasa de 26 a 42%. En cuanto al contenido de proteína sería menor sin embargo, el propósito de este proyecto es el de comparar estas características fisicoquímicas con las del producto obtenido en el equipo de secado.

4.2.2. De la determinación de parámetros de secado.

Se evaluaron los parámetros de temperatura de alimentación (TA_1 , TA_2) y Concentración de alimentación (CA_1 , CA_2 , CA_3). Del **Anexo 1** en el **Cuadro 1**, se muestran los resultados de la determinación de humedad del producto final y rendimiento del proceso, en un diseño factorial de 2 x 3 con 3 repeticiones.

Los análisis de varianza al 0.01% de significancia que se muestran en los Cuadros 19 y 20, fueron altamente significativos en efectos principales de los factores de estudio: concentración de alimentación, ($CA_1:25\%$, $CA_2:30\%$, $CA_3:35\%$), y en la Temperatura de alimentación ($TA_1:20^\circ C$, $TA_2:30^\circ C$) resultando altamente significativa; lo que indica que existen diferencias reales entre los parámetros evaluados, destacando entre ellos la Concentración de alimentación y su influencia sobre los demás factores.

Cuadro 19. Análisis de varianza para el contenido de humedad.

FUENTE DE VARIABILIDAD	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Pr>F	
Temperatura de Alimentación (A)	1	2.60680556	2.60680556	769.22	<.0001	**
Concentración (B)	2	34.25187778	17.12593889	5053.56	<.0001	**
A x B	2	1.85601111	0.92800556	273.84	<.0001	**
Error	12	0.04066667	0.00338889			
Total	17	38.75536111				
R-cuadrado		Coef. Var.	Raíz MSE	Media		
0.998951		0.899369	0.058214	6.472778		

La interacción existente de la concentración en el proceso de secado demuestra que, ante un cambio en la concentración de alimentación la humedad del producto sufre un cambio significativo ya que según Masters (2002), indica que la alta concentración de solutos a atomizar, disminuye el contenido de humedad del producto pues habrá menos agua para evaporar. Por lo tanto incrementando los sólidos en la alimentación durante el proceso de secado se obtienen productos con menor humedad residual.

La variación de humedad que registro el producto a $TA_2:30^\circ C$ nos indica, que al aumentar la temperatura del alimento, entra más calor en el proceso de secado, lo que influye en la reducción de humedad en el producto además de reducir la viscosidad en el alimento, Masters (1991) manifiesta que incrementando la temperatura del alimento se reduce el calor requerido para producir una unidad másica de producto seco. Por lo tanto el aire caliente durante el proceso de secado se enfría menos a $TA_2:30^\circ C$ en comparación a $TA_1:20^\circ C$, obteniéndose así menor humedad residual en el producto.

Cuadro 20. Análisis de varianza para el contenido de rendimiento de proceso.

FUENTE DE VARIABILIDAD	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Pr>F	
Temperatura de Alimentación (A)	1	7.906939	7.906939	18.41	0.0010	**
Concentración (B)	2	1594.715511	797.357756	1856.82	<.0001	**
A x B	2	3.677378	1.838689	4.28	0.0395	*
Error	12	5.153067	0.429422			
Total	17	1611.452894				
R-cuadrado		Coef. Var.	Raíz MSE	Media		
0.996802		0.961850	0.655303	68.12944		

Los valores de Rendimiento de Proceso, Indican que cuanto menor es la concentración de la solución menor es la cantidad de soluto en cada gotita formada Nukiyama y Tanasawa (1938) y Masters (1991) manifiestan que, la reducción de la concentración de la solución está limitada por el factor económico, pues cuanto menor sea la concentración de la solución se gasta más energía para secar una misma masa de solución obteniéndose menos rendimientos.

Al aumentar el porcentaje de concentración en la solución de 30% y 35% se obtuvieron mejores rendimientos, sin embargo se redujo la facilidad de atomización provocando un mayor tiempo en la obtención del producto al presentar un aumento en su viscosidad. Al respecto Masters (2002) menciona que, para obtener la máxima utilización del calor, se deben alimentar la máxima cantidad de sólidos posibles, este nivel máximo lo determinan dos parámetros: la facilidad de bombear y atomizar, por ello muchos secadores por atomización operan con bajos niveles de sólidos y comparativamente bajas temperaturas de secado estas condiciones son dictadas por las propiedades del alimento.

Si bien, el análisis de varianza resumido en los **Cuadros 19 y 20**, nos muestran que hay diferencias altamente significativas entre las medias de los tratamientos; este análisis, no nos revela cuales diferencias pueden considerar estadísticamente significantes. Por tanto, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de TUKEY, con un nivel de confianza del 99%.

De las comparaciones de Tukey en los **Cuadros 21 y 22**; se observa que a $TA_2:30^{\circ}C$ y $CA_3=35\%$ se encontró menores cantidades de humedad residual en el producto con un promedio de 6.09% y 4.76% respectivamente, estos valores fueron menores en comparación a $TA_1:20^{\circ}C$ y $CA_1=25\%$ y $CA_2=30\%$. En conclusión podemos indicar que a mayor temperatura y concentración de alimentación se obtienen menos porcentajes de humedad residual en el producto.

Cuadro 21. Prueba de rango múltiple de Tukey para temperatura de alimentación.

Tukey ($P \leq 0.01$)	Media	Número de observaciones	Temperatura Alimentación
A	6.85333	9	20
B	6.09222	9	30

Cuadro 22. Prueba de rango múltiple de Tukey para concentración.

Tukey ($P \leq 0.01$)	Media	Número de observaciones	Concentración
A	8.14333	6	25
B	6.51000	6	30
C	4.76500	6	35

De la misma prueba de comparaciones de Tukey en los **Cuadros 23 y 24**; se observa los efectos de temperatura y concentración de alimentación con el rendimiento de proceso, obteniéndose mejores resultados con una $TA_2:30^{\circ}C$ y $CA_3=35\%$ en la que se encontró 68.79% y 77.9% en promedio de rendimiento de proceso que supero a $TA_1:20^{\circ}C$ y $CA_1=25\%$ y $CA_2=30\%$. Decir que a mayor temperatura y concentración mayor será el rendimiento de proceso. Esto significa que el rendimiento de proceso varía con cada una de las temperaturas y concentraciones propuestas.

Cuadro 23. Prueba de rango múltiple de Tukey para temperatura de alimentación.

Tukey ($P \leq 0.01$)	Media	Número de observaciones	Temperatura Alimentación
A	68.7922	9	30
B	67.4667	9	20

Cuadro 24. Prueba de rango múltiple de Tukey para concentración.

Tukey ($P \leq 0.01$)	Media	Número de observaciones	Concentración
A	77.9750	6	35
B	70.9650	6	30
C	55.4483	6	25

4.2.3. Evaluación del producto final.**a. Características físico-químicas.**

En el **Cuadro 25**, se presentan los datos de características fisicoquímicas de la leche en polvo (con 4.68% de humedad y 77.58 % rendimiento) obtenido luego de realizar los ensayos experimentales.

Cuadro 25. Características fisicoquímicas de la leche entera en polvo a diferentes concentraciones.

Características	Producto Final C=35%, T=30°C	Producto Final C=25%, T=30°C
Humedad (%)	4.68	7.29
Proteínas (%)	24.27	24.36
Grasa (%)	27.30	27.32
Carbohidratos (%)	46.42	45.86
Energía (Kcal/100g)	517.24	521.63
Fibra (%)	-	-
Cenizas (%)	-	-
Acidez %	0.08	0.1
Impurezas macroscópicas %	0.00	0.00

FUENTE: LABORATORIO DE ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE INIA, ILLPA-PUNO

Se observan diferencias en cuanto al contenido de humedad residual en ambas muestras, es debido a la diferencia de sólidos totales contenidos en la alimentación de ambos tratamientos, lo que indica que la muestra C=35%, T=30°C tuvo menor cantidad de agua a evaporar durante el proceso de secado a las mismas condiciones.

b. Tamaño de partícula.

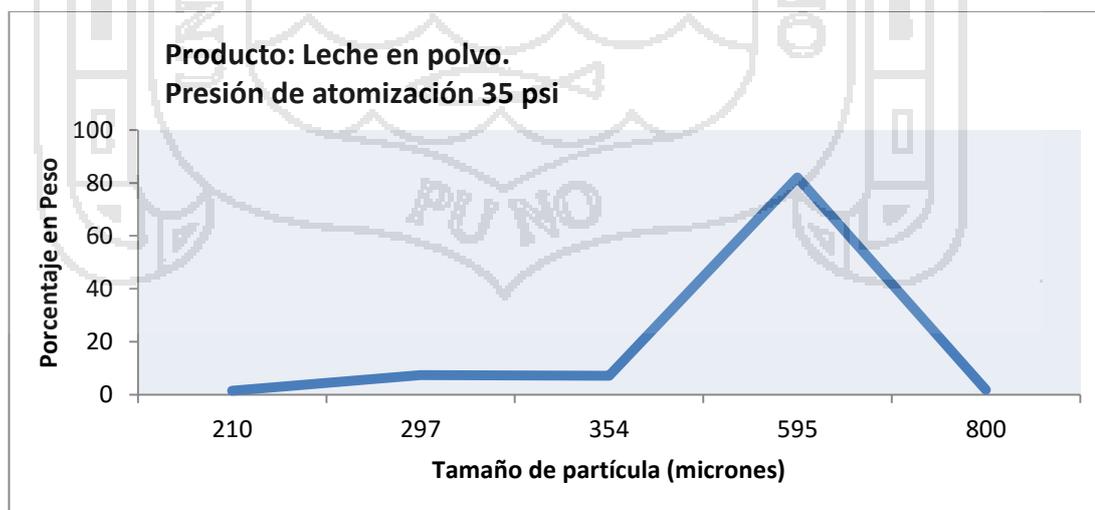
En el Cuadro 26, se muestra los resultados del análisis granulométrico y en la Figura 28, se visualiza la distribución del tamaño de partícula en función del porcentaje en peso por tamaño de micrones.

Cuadro 26. Análisis granulométrico de distribución de partículas por tamaño.

Tamaño (micron)	Peso (gramo)	% Peso
800	1.9	1.90
595	82.2	82.04
354	7.2	7.19
297	7.4	7.39
210	1.5	1.50
Total	100.2	100

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Figura 28. Distribución de tamaño de partícula del producto en polvo.



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El tamaño de partícula está influenciado particularmente por la presión de atomización y la concentración del contenido de sólidos. Por lo tanto los tamaños de partículas obtenidos son relativamente grandes que mejoran las propiedades físicas del alimento, como lo indica Masters (2002), las partículas grandes se dispersan sin problemas de apelmazamiento al disolverse en agua.

4.3. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS ENTRE EL PRODUCTO Y LA MATERIA PRIMA UTILIZADA.

La finalidad de realizar esta comparación fue para determinar la cantidad de las características fisicoquímicas antes y después del proceso de secado. En el **Cuadro 27**, se presenta la comparación de las características fisicoquímicas de la materia prima y el producto final.

Cuadro 27. Comparación de características fisicoquímicas de la materia prima y el producto final.

Características	Materia Prima	Producto Final C=35%, T=30°C	Producto Final C=25%, T=30°C
Humedad (%)	5	4.68	7.29
Proteínas (%)	26.20	24.27	24.36
Grasa (%)	27.50	27.30	27.32
Carbohidratos (%)	45.11	46.42	45.86
Energía (Kcal/100g)	532.76	517.24	521.63
Fibra (%)	-	-	-
Cenizas (%)	-	-	-
Acidez %	0.04	0.08	0.1
Impurezas macroscópicas %	0.00	0.00	0.00

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Con respecto al contenido de proteína de la muestra C=35%, T=30°C se obtuvo 24.27% en comparación a la materia prima inicial que tenía 26.2% donde la disminución es mayor debido a que en esta muestra la cantidad de agua a evaporar fue menor (mayor contenido de sólidos alimentados), además de que todos los tratamientos fueron sometidos a la misma cantidad de calor, para esta muestra los sólidos totales tuvieron mayor contacto con el calor en comparación a la muestra C=25%, T=30°C. Las condiciones de secado para las muestras fueron de T° entrada 160 °C y salida 80 a 90 °C, además de que el tiempo de contacto es muy corto (5 a 7

s) permiten que el daño debido al calor sea mínimo para producto obtenido en el equipo de secado, esto debido a que a temperatura de salida de aire, corresponde a una temperatura de bulbo húmedo (y temperatura del producto) de 40-50 °C, de este modo el producto no está sujeto a altas temperaturas y cuando es separado del aire de secado está libre de cualquier calor que pueda degradarlo (Fellows, 1993).

Según Masters (1991), la transferencia de masa y calor durante el deshidratado, ocurre entre el aire y una capa de vapor formada alrededor de las gotas. Esta capa protectora de vapor mantiene a la gota a la temperatura de saturación y el proceso de evaporación ocurre a esta temperatura. En este contexto podemos explicar el menor porcentaje de pérdidas de nutrientes en el ensayo $C=25\%$, $T=30^{\circ}\text{C}$ debido a que contiene una mayor porcentaje de vapor enfriado alrededor de las partículas esto sumado al tiempo de residencia calculado (5.2 a 7 s) que permite conservar los nutrientes del producto.

Una forma de conservar los nutrientes es la microencapsulación por secado por atomización, la cual es una técnica que se ha aplicado para preservar y/o proteger numerosos alimentos. Al respecto Rodríguez, (2004) menciona, que en la industria alimentaria se utilizan diferentes materiales como agentes encapsulantes, tales como carbohidratos, esteroides, gomas, lípidos, proteínas y materiales inorgánicos. Por lo que la aplicación de aditivos en el proceso de secado por atomización puede ayudar a conservar los nutrientes de mejor manera especialmente para los alimentos ricos en azúcares.

El objetivo de las pruebas en el equipo, fue obtener un producto en polvo con buenas propiedades fisicoquímicas y establecer el efecto de las condiciones del alimento (TA y CA) en el proceso de secado y en el producto final. En este contexto, podemos indicar que se obtienen mejores resultados fisicoquímicos con los tratamientos de $CA=25\%$, además de ser más fácil de atomizar a pesar de obtenerse un mayor contenido de humedad residual. Estas pueden variarse en equipo ya sea aumentando la temperatura de aire de secado y/o bajando el flujo de alimentación, disminuyéndose así el calor requerido por el secador para generar un producto con determinadas características (menor humedad residual).

4.4. EFICIENCIA TÉRMICA Y TIEMPO DE RESIDENCIA.

El funcionamiento del equipo de secado por atomización ha sido evaluado (a los parámetros de diseño) en términos de eficiencia térmica máxima (86.1%), eficiencia térmica global (60.56%), eficiencia evaporativa (70.32%) y tiempo de residencia (5.2 a 7 s) que es mayor al tiempo de secado planteado para el diseño (4 s), los valores hallados están dentro de los equipos estándares de secado por atomización (Los cálculos de eficiencia térmica se muestran en el **Anexo 5**. Los resultados obtenidos tienen sentido, según lo mencionado por diferentes autores de bibliografías referente al diseño de este equipo, que se basan más en datos empíricos y experiencia, que en análisis matemático.

Al inicio de este proyecto se tomó como datos de referencia los resultados experimentales de un secador por atomización con disco centrífugo de NIRO ATOMIZER y otro con tobera neumática (diseño y construcción de secador por atomización de tobera neumática), lo que nos permitió acercarnos más a nuestra realidad. Sin embargo comparando con las especificaciones de equipos similares fabricados por empresas extranjeras (que lo comercializan), los resultados obtenidos son aceptables, tal como se muestra en el **Cuadro 28**.

V. CONCLUSIONES.

- Se construyó un secador por atomización con tobera neumática de mezcla externa; con las especificaciones siguientes: La presión de atomización varían desde 0 a 80 *psi* dependiendo del compresor, carga térmica (hasta 10 *kW*), diámetro interno y altura de la cámara de secado ($D_c = 0.50\ m$ y $H = 1.70\ m$), dimensiones del ciclón ($D_c = 0.18\ m$), especificaciones del ventilador (Pot. = $\frac{1}{2}\ hp$), diámetro de la tubería de transporte (2 *pulg.* = 50 *mm* de diámetro exterior). Para un mejor control de las condiciones de operación del equipo, se ha automatizado parcialmente (panel de control), donde se controla la temperatura de entrada de aire caliente con su controlador-indicador Set Point tipo ON/OFF, que enciende y apaga el calefactor a gas; el contenido de humedad a la salida del secador se mide indirectamente con un indicador digital de temperatura. Obteniéndose un producto con características fisicoquímicas aceptables.
- Para las pruebas experimentales se establecieron como condiciones mínimas una presión de atomización de 35 *psi*, Temperatura de entrada de 160°C y salida de 80°C. Al realizar las pruebas experimentales con los parámetros de Temperatura de 20, 30°C y Concentración de 25, 30 y 35%, se observó que los parámetros de Temperatura y Concentración que tuvieron mayor influencia para el proceso de secado en el equipo, fueron a Concentraciones (CA) 25% y Temperaturas (TA) 30°C por su mayor facilidad de atomización (menor viscosidad), obteniéndose una humedad en el producto de 7.29% y rendimiento de proceso de 57.50%.
- De la comparación de las características fisicoquímicas (ambos en base seca), de la materia prima utilizada y el producto obtenido en el secador a C=25% y TA=30°C (con: proteína 24.36%, grasa 27.32% y carbohidratos 45.86%), no se observa diferencia significativa entre las propiedades fisicoquímicas del producto y la materia prima. Por lo que este proceso de secado cubre las expectativas del producto en cuanto a las propiedades fisicoquímicas se refiere.

VI. RECOMENDACIONES.

- Continuar con los estudios, para la optimización del equipo, en cuanto se refiere al dispositivo de atomización (tobera neumática).
- Mejorar el diseño del calefactor de aire para que este sea de forma indirecta.
- Automatizar el flujo de alimentación, mediante una bomba dosificadora y una válvula de control.
- Para una mayor precisión en los cálculos de diseño, se recomienda mejorar las ecuaciones aquí planteadas y con métodos de resolución de ecuaciones más riguroso.
- Continuar con la automatización, para la adquisición de datos en computadora a través de dispositivos PLC y accesorios.
- Para el proceso de secado de otros productos: El secado por atomización debe manejar bajas temperaturas como sea posible, emplear aditivos de forma controlada para el secado de alimentos con condiciones especiales.

VII. BIBLIOGRAFÍA.

1. **Barbosa, G. & Mercado, H.** (2000). *“Deshidratación de Alimentos”*. (1ra ed.). Zaragoza, España: Editorial Acribia.
2. **Bonnell, K. & Poe, C.** (1999). *“Selecting low-flow pumps. En: Chemical Engineering”*. (vol. 106, N° 2). Usa: Editorial McGraw-Hill.
3. **Bylund, G.** (1995). *“Milk Powder. In: Dairy processing Handbook. Tetra Pak Processing Systems AB. Sweden “*.
4. **Branan, C.** (1994). *“Rules of Thumb for Chemical Engineers”*. Usa: Gulf Publishing Company.
5. **Codex Stan.207.** (1999). *“Normas del Codex para las leches en polvo y la nata (crema) en polvo”*. Perú.
6. **Cook E. & Du Mont, H.** (1991). *“Process Drying Practice “*. Usa: Editorial McGraw-Hill. (pp. 40-51).
7. **Cueva, V. J.** (1995). *“Diseño, construcción y evaluación de un secador neumático piloto para secado de bagazo con gases de combustión en la C.A. Casa Grande”*. Ayacucho, Perú.
8. **Deutschman, A., Michels, W. & Wilson, C.** (1996). *“Diseño de máquinas teoría y prácticas”*. (7ma ed.). México: Editorial Continental.
9. **Escamilla E., Rocha A. & Martinez, G.** (1993). *“Cálculos para el Diseño de un Secador por Aspersión”*. (Revista de Ingeniería Química- Agosto). México: Editorial Limusa. (pp. 61-65).
10. **Espinoza, M.C. & Herrera, E.C.** (2003). *“Planta Productora de polvos Solubles (Guayaba)”*. (Tesis IQ. UAMUI). México: Editorial Limusa.
11. **Fellows, P.** (1993). *“Tecnología del procesado de los Alimentos”*. Zaragoza, España: Editorial Acribia.

12. **Filková, I., Mujumdar, A.** (1985). *“Industrial spray Drying Systems”*. USA.
13. **Filková, L., Huang, L. X. & Mujumdar, A.S.** (2006). *“Industrial spray drying systems. In: Handbook of Industrial Drying”* (3ra Edición). New York: CRC Press.
14. **Geankoplis, C. J.** (1998). *“Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”*. (3ra Edición). México: Editorial Continental.
15. **Ibarz, A., Barbosa, G., Garza, S. & Gimeno, V.** (2000). *“Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria”*. Zaragoza, España: Editorial Acribia.
16. **Jaya, S. & Das, H.** (2007). *“Transition and Sticky Point Temperatures and Stability/Movility Diagram of Fruit Powders, Food Bioprocess Technol”*. Estados Unidos de America.
17. **Kalpakjian, S. & Schmid, R.** (2004). *“Manufacturas, ingeniería y tecnología”*. España: Editorial Pearson.
18. **King, F.** (1992). *“El Aluminio y sus aleaciones”*. (1ra ed.). México: Editorial Limusa.
19. **Koch, W. & Licht, W.,** (1977). *“New desing approach boosts cyclone efficiency, Chem. Eng.”*. Estados Unidos de America.
20. **Lansheras, E. & Sanchez, M.** (1972). *“Tecnología de materiales industriales”*. (3ra ed.). Barcelona, España: Ediciones Cedel.
21. **Madrid, A.** (1996). *“Curso de Industrias Lácteas”*. (1ra ed.). Madrid, España: Editorial Mundi Prensa.
22. **Mafart, P.** (1994). *“Ingeniería Industrial Alimentaria”*. (Primera edición). Zaragoza, España: Editorial Technique et Documentation-Laviosier.
23. **Marks, M.** (1984). *“Manual de ingeniero mecánico”*. New York, Estados Unidos de América: Editorial McGraw-Hill.
24. **Marcilla, G. A.** (1998). *“Introducción a las Operaciones de Separación”*. España: Publicaciones Universidad de Alicante.

25. **Masters, K.** (1972). *"Spray Drying and Introduction to Principies, Operational, Practice and Applications"*. Estados Unidos de America: Leonard Hill Books.
26. **Masters, K.** (1985). *"Spray Drying Handbook"*. (4ta ed.).Gran Bretaña: Britain Library Publications.
27. **Masters, K.** (1991). *"Spray drying Handbook"*. (5ta ed.). Londres: Longman Scientific and Technical. Estados Unidos de America: Editorial McGraw-Hill.
28. **Masters, K.** (2002). *"Spray Drying in Practice"*. SprayDryConsult International ApS, Krathusparken. Gran Bretaña. Britain Library Publications.
29. **Mendoza, N., Romo, M.T. & Serratos, I.** (2003). *"Dimensionamiento y construcción de un secador por aspersion de nivel de laboratorio"*. Tesis IA. UPIBI-IPN. México.
30. **Mendoza, R.** (1995). *"Informe final de Diseño de un Secador por Atomización para la elaboración de productos en polvo"*. UNSCH – Ayacucho.
31. **Mermelstein, N. H.** (2001). *"Food Technology Magazine"*. (vol. 55, N° 4).
32. **Mulvaney, Steven J. Shririk R. & Syed S.** (2003). *"Ingeniería de los alimentos, operaciones unitarias y prácticas de laboratorio"*. México: Editorial Limusa.
33. **Mujumdar, A.S.** (1995). *"Handbook of Industrial Drynig "*. New York, Estados Unidos de América: Editorial Marcel Dekker.
34. **Mott, R.** (1996). *"Mecánica de fluidos aplicada"*. (4ta ed.). México: Editorial Hispanoamericana.
35. **Nonhebel, G., Moss, A.A.** (1979). *"El secado de sólidos en la industria química"*. (Versión español, Dr. Marcelo Terrizano). España: Editorial Reverte.
36. **Nukiyama, S., & Tanasawa, Y.** (1938). *"Experiment on atomization of liquid by means of air stream. Transactions of the Society of Mechanical Engineers-Japan"*. (4ta ed., N° 14).

37. **Oakley, E.** (1997). *“Produce Uniform Particles by Spray Drying Energy transfer/conversion – Chemical Engineering Progress”*. (Oct., pp. 48-54).
38. **Perry, R. & Chilton, C.** (1973). *“Chemical Engineers Handbook. International student”*. (Edition, Fifth). Japon: Editorial McGraw-Hill. Kogasuka.
39. **Perry, C.** (1992). *“Manual del Ingeniero Químico”*. (3ra ed.). México: Editorial McGraw-Hill.
40. **Perry, R.** (2001). *“Manual del Ingeniero Químico”*. (3ra ed.). México: Editorial McGraw-Hill.
41. **Pilligua, L. I.** (2006). *“Tesis “Diseño de un software para calcular cámaras frigoríficas”*, Universidad Politécnica del Litoral Guayaquil, Ecuador.
42. **Rodríguez, G. R.** (2004). *“Secado por Aspersión de Tuna (Opuntia Streptacantha): Efecto sobre las propiedades fisicoquímicas del polvo y del producto reconstituido.* Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, México.
43. **Singh, R., Heldman, D.,** (1998). *“Introducción a la ingeniería de los alimentos”*. (2daa Edición). Zaragoza España: Editorial Acribia, S.A.
44. **Treybal, R.** (1993). *“Operaciones de Transferencia de Masa”*. (2da ed.). México: Editorial McGraw-Hill.
45. **Tipe, G.** (2004). *“Diseño de un Secador por Atomización para con tobera neumática”* UNSCH, Ayacucho.
46. **Tiras, C.** (1999). *“Get the most from your electric process heater. En: Chemical Emgineering”*. (vol. February, vol. 108, N° 2).
47. **Westergaard, V.** (2004). *Tecnología de la Leche en Polvo. Evaporación y Secado por Atomización.* Copenhague: Niro Atomizer A/S. pág. 349.
48. **Zenz, F.** (2001). *“Cyclone desings Tips. En: Chemical Engineering”*. (vol. 108, N° 1, pp. 60-64).

Páginas Web:

49. ISOVER, (2012). “*Manual de aislamiento en la industria*”. [En línea]. (Consultado el 18 de Febrero del 2010). Disponible en URL:

<http://www.ingenieroambiental.com/4006/Acustica%20Edificio%20-%20Manual%20Aislamiento%20Industrial%20Isover.pdf>

50. NIRO ATOMIZER, (2010). [En línea]. “*Spray Drying*”. (Consultado el 18 de febrero del 2010-17:30). Disponible en URL:

<http://www.niro.com/niro/cmsdoc.nsf/webdoc/webb8jnbvl>

51. SPRAY PROCESS, (2012). [En línea]. “*Secado por atomización*”.

(Consultado el 15 de julio del 2012 -13:30). Disponible en URL:

<http://www.sprayprocess.com.br/espanhol/secado-por-atomizacion.asp>



VIII. ANEXOS.

ANEXO 1. RESULTADOS ESTADÍSTICOS.

Cuadro A.1. Valores de Humedad del producto final y humedad Removida en el experimento de secado.

#	TA	CA	HUMEDAD %	RENDIMIENTO %
1	20	25	9.10	53.58
2	20	25	8.87	54.20
3	20	25	8.92	54.80
4	20	30	6.76	70.11
5	20	30	6.80	70.88
6	20	30	6.75	70.18
7	20	35	4.85	78.70
8	20	35	4.83	77.80
9	20	35	4.80	76.95
10	30	25	7.36	55.91
11	30	25	7.29	57.50
12	30	25	7.32	56.70
13	30	30	6.25	71.49
14	30	30	6.30	71.09
15	30	30	6.20	72.04
16	30	35	4.70	78.82
17	30	35	4.73	78.00
18	30	35	4.68	77.58

Donde:

TA = Temperatura de alimentación
(T1: 20°C y T2:30°C)CA = Concentración de alimentación
(C1: 25%, C2:30% y C3: 35%)

H = Humedad final (%)

R = Rendimiento (%)

Cuadro A.2. Cálculo de Rendimiento de Proceso.

		AGUA	MATERIA PRIMA		ALIMENTACIÓN	PRODUCTO EN POLVO		RENDIMIENTO
TA	CA	(ml)	Peso (g)	Humedad (%)	Sólidos (g)	Peso (g)	Humedad (%)	(%)
20	25	500	125	5	118.75	63.63	9.10	53.58
20	25	500	125	5	118.75	64.36	8.87	54.20
20	25	500	125	5	118.75	65.08	8.92	54.80
20	30	500	150	5	142.5	99.90	6.76	70.11
20	30	500	150	5	142.5	101.00	6.80	70.88
20	30	500	150	5	142.5	100.01	6.75	70.18
20	35	500	175	5	166.25	130.83	4.85	78.70
20	35	500	175	5	166.25	129.34	4.83	77.80
20	35	500	175	5	166.25	127.93	4.80	76.95
30	25	500	125	5	118.75	66.39	7.36	55.91
30	25	500	125	5	118.75	68.28	7.29	57.50
30	25	500	125	5	118.75	67.33	7.32	56.70
30	30	500	150	5	142.5	101.88	6.25	71.49
30	30	500	150	5	142.5	101.30	6.30	71.09
30	30	500	150	5	142.5	102.66	6.20	72.04
30	35	500	175	5	166.25	131.04	4.70	78.82
30	35	500	175	5	166.25	129.68	4.73	78.00
30	35	500	175	5	166.25	128.98	4.68	77.58

Cuadro A.3. Efecto simple de la temperatura de alimentación dentro de las concentraciones.

Concentración	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Pr>F	
25	1	4.034400	4.034400	1190.48	<.0001	**
30	1	0.405600	0.405600	119.69	<.0001	**
35	1	0.022817	0.022817	6.73	0.0235	*

Cuadro A.4. Efecto simple de la concentración dentro de las temperaturas de alimentación.

Temperatura Alimentación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Pr>F	
20	2	25.699267	12.849633	3791.70	<.0001	**
30	2	10.408622	5.204311	1535.70	<.0001	**

Cuadro A.5. Efecto simple de la temperatura de alimentación dentro de las concentraciones.

Concentración	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Pr>F	
25	1	9.450150	9.450150	22.01	0.0005	**
30	1	1.983750	1.983750	4.62	0.0527	n.s.
35	1	0.150417	0.150417	0.35	0.5649	n.s.

Cuadro A.6. Efecto simple de la concentración dentro de las temperaturas de alimentación.

Temperatura Alimentación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Pr>F	
20	2	875.549267	437.774633	1019.45	<.0001	**
30	2	722.843622	361.421811	841.65	<.0001	**

ANEXO 2. ASPECTO ECONÓMICO

Se determina con la finalidad de conocer el costo total del diseño y construcción del secador por atomización a nivel de laboratorio con tobera neumática, que comprende el costo de construcción del equipo y el costo de puesta en operación.

Costo de Construcción.

En el **Cuadro B.1** se detallan los costos de cada rubro y especificaciones que se consideran en la construcción del equipo.

Cuadro B.1. Costo por rubros y especificaciones de la construcción del equipo.

Rubros	Especificaciones	Costo (S/.)	Total (S/)
Diseño	Revisión Bibliográfica, internet	300	1800
	Viajes	1000	
	Elaboración de planos	500	
Materiales	Cámara de secado:		5380
	5 planchas de acero inoxidable	3000	
	Lana de roca mineral	400	
	Tubería de transporte		
	1 Tubo de acero inox.	270	
	3 abrazaderas	150	
	4 Codos de 30 y 90° en inox. 2"	200	
	Tobera		
	1 pistola Aerodinámica	70	
	3 m manguera alta presión	30	
	Estructura de soporte		
2m de tubo 2"x1.5m 304-2B	120		
1 varilla de tubo cuadrado inox.	250		
2 metros de tubo cuadrado inox.	90		
Soldadura:			
1 lata de electrodos de acero inox.	300		
Electrodos de Fierro	50		
1/2 caja de Argon	250		
Adquisición y transporte de materiales		200	
Equipos	Ciclón (material de acero inox)	900	3940
	Ventilador Extractor (acero inox)		
	Recirculador-ventilador motor de 1/2 HP, 3465 RPM, 220 V, monofásico	100 1000	
	Calentador a gas (material de acero inox)		
Lana de roca mineral	150		

	Quemador	35	
	Válvula de Gas	70	
	2.5 m Manguera de gas	18	
	1m cañería de cobre	20	
Sistema de Control	Panel de Control		
	1/2 plancha de acero inox	200	
	Contactador electric	250	
	Pirómetro Tolz	360	
	Termocupla tipo J	60	
	Pirómetro Stronger	360	
	Termocupla Stronger Tipo J	75	
	Selenoide	240	
	Botones	32	
	10 m Cable Vulcanizado	70	
Ensamblaje	Otros Materiales		300
	Regulador de Presión	60	
	Siliconas de alta temperature	24	
	2 llaves de quemador	14	
	1 "T" paso de gas	10	
	10 Abrasaderas	20	
	4 Acoples para tobera	24	
	Discos de esmeril	50	
	3 motas pulido	18	
	Ácido de limpieza	30	
	10 pernos de inox	20	
	Pernos, tuercas, etc	30	
Mano de obra	02 Servicios no personales	6500	6500
Gastos Generales	Materiales de escritorio (papeles, Usb, DVD, etc)	500	2150
	Elaboración de informes (parciales, final, fotos, etc)	500	
	Infraestructura (depreciación aprox de quipos usados en el taller)	1000	
	Otros gastos (menores)	150	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En el **Cuadro B.2**, se presentan los costos de construcción del equipo en forma resumida, siendo el total de S/20,070.00 (veinte mil con setenta Nuevos soles).

Cuadro B.2. Costo de construcción del equipo.

RUBROS	COSTOS (S/.)
Diseño.	1800
Materiales.	5380
Equipos.	3940
Ensamblaje.	300
Mano de obra.	6500
Gastos generales.	2150
Costo Total (S/.)	20070

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Costo de la puesta en operación.

Realizada la construcción del equipo, es necesario ponerlo operativo para realizar la evaluación de los parámetros y aproximarlos a las condiciones de diseño. Este costo implica las pruebas de evaluación del referido equipo de secado. En el **Cuadro B.3**, se detallan los costos de cada rubro y especificaciones que se consideran en la puesta en operación del equipo. En el **Cuadro B.4**, se presentan los costos de la puesta en operación en forma resumida siendo el total de S/ 670 (seiscientos setenta Nuevos soles).

Cuadro B.3. Costo de puesta en operación del equipo.

RUBROS	ESPECIFICACIONES	COSTO TOTAL (S/.)	TOTAL (S/.)
Materia prima.	6 litros de leche de tarro.	40	260
	50 Bolsas de leche Pura Vida.	180	
	Agua destilada.	20	
	Adquisición y transporte M.P.	20	
Consumo de energía, gas y agua.	2 meses (4 horas diarias) de consumo de energía monofásica (2 kWx4hx60dias)	250	340
	Balón de gas.	70	
	2 meses consumo de agua.	15	
Gastos generales.	Materiales de limpieza.	50	70
	Otros gastos.	20	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Cuadro B.4. Costo de prueba en operación del equipo.

RUBROS	COSTOS (S/.)
Materia Prima	260
Consumo de energía, gas y agua	340
Gastos generales	70
Costo Total (S/.)	670

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Costo total del equipo.

Determinados los costos de construcción y puesta en operación, se calcula el costo total del diseño y construcción del equipo de secado por atomización a nivel de laboratorio, que asciende a S/. 20,740.00 (veinte mil setecientos cuarenta nuevos soles) y se presenta en el

Cuadro B.5.**Cuadro B.5. Costo total del diseño y construcción del equipo.**

RUBROS	COSTO (S/.)
Costos de construcción	20 070
Costo de Puesta en operación	670
Costo total (S/.)	20 740

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

ANEXO 3. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE HÚMEDO

1. CÁLCULO DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA.

Para el uso de los datos psicrométricos, es necesario conocer dos de los datos, en este caso humedad relativa (HR) y temperatura de bulbo seco (T_{bs}), los datos obtenidos están relacionados directamente con la presión atmosférica, así que también es un dato a calcular. Para calcular la presión atmosférica se utilizara la siguiente ecuación.

$$P = P_0 * \left(1 - \frac{k}{T_s} * h\right)^{\frac{g}{k * R'}} \quad \text{Ecuación (i)}$$

Donde: P_0 es la presión a nivel del mar (atm), $k=0.0065$ K/m, es la tasa de variación de la temperatura con la altitud, $T_s=228,15$ k es la temperatura en superficie, $g= 9,81$ m/s², la aceleración de la gravedad, $R'= 287$ J/kg K, el cociente entre la constante universal de los gases R y el peso molecular M del aire, $h=$ altura sobre el nivel del mar.

Como reducción y/o simplificación de esta fórmula se tiene:

$$P = P_0 * (1 - 22.558 * 10^{-6} * h)^{5.259}$$

Dónde:

$P_0 =$ presión atmosférica a 0 msnm = 1 atm, $h =$ altura ciudad de Puno = 3825 msnm.

$$P = 1 * (1 - 22.558 * 10^{-6} * 3825)^{5.259}$$

$$P = 0.6222 \text{ atm} = 0.0630593 \text{ Pa}$$

2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD ABSOLUTA DEL AIRE EN FUNCIÓN A LAS PROPIEDADES PSICROMÉTRICAS.

Para el cálculo de la humedad del aire se utiliza la siguiente expresión:

$$Y_{G1} = 0,62 \frac{P_v}{P - P_v} \quad \text{Ecuación (ii)}$$

Donde:

P_v = Presión parcial de vapor (Pa)

P = Presión atmosférica del lugar (Pa)

- La presión parcial de vapor es igual a:

$$P_v = \Phi \cdot p_{vs}$$

Ecuación (iii)

Donde:

Φ = Humedad relativa del aire. 55%

p_{vs} = Presión de saturación del vapor (Pa)

- La presión de vapor de vapor del aire atmosférico se determina en forma analítica o mediante las tablas de vapor saturado, y es:

Según tablas vapor saturado a $T_{bs} = 23^\circ\text{C}$, se tiene $p_{vs} = 0.002808$ Pa

Reemplazando p_{vs} en la ecuación (iii) con HR=55% se tiene:

$$P_v = 0.5 \cdot 0.002808 = 0.0015444 \text{ Pa}$$

Reemplazando P_v en la ecuación (ii) con $P = 0.0630593$, se tiene:

$$Y_{G1} = 0,62 \frac{0.0015444}{0.0630593 - 0.0015444} = 0.01589224$$

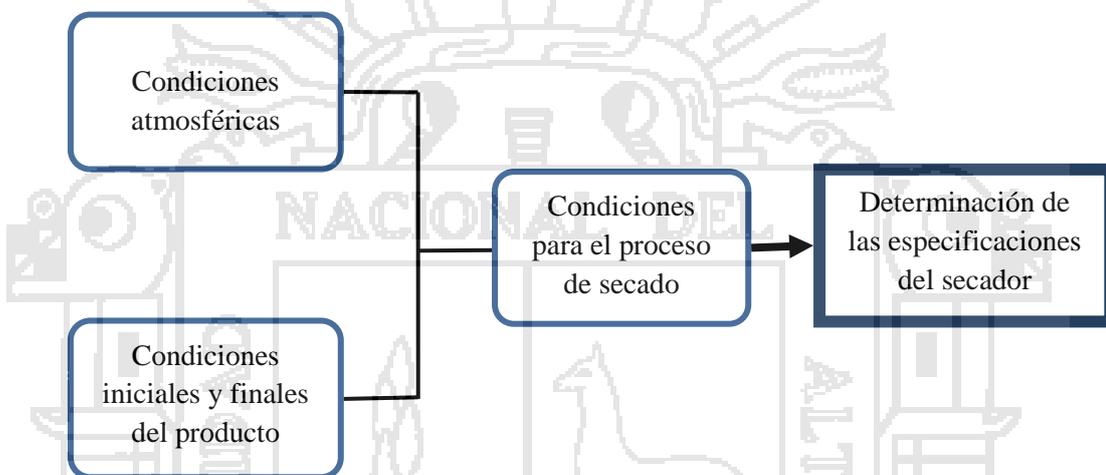
$$Y_{G1} = 0.01589 \text{ (kg } H_2O/\text{kg aire seco)}$$

ANEXO 4. CÁLCULO DISEÑO DEL LA CÁMARA DE SECADO Y EQUIPOS AUXILIARES DEL SECADOR POR ATOMIZACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO.

1. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Las condiciones de secado se pueden dividir en tres tipos, tal como se muestran en la **Figura A-1**, que nos llevan a la determinación de las especificaciones del secador.

Figura A-1. Condiciones de secado para el diseño.



Las condiciones de operación fijadas como parámetros de diseño son resumidas en el **Cuadro C.1**.

Cuadro C.1. Condiciones de operación.

CORRIENTE DE AIRE	
Temperatura de entrada	200 °C
Temperatura de salida	91 °C (como valor mínimo)
Temperatura del medio ambiente	23 °C
CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN LÍQUIDA	
Temperatura de alimentación	30 °C
Porcentaje de sólidos (concentración)	25% (si es diluido se concentra previamente)
Fluido considerado para determinar las propiedades	Leche descremada
ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO SECO	
Producción	1.5 kg/h
Humedad final	5% como máximo
Temperatura final de secado a la salida de la cámara	90 °C

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

PROPIEDADES FÍSICAS.

Para la predicción de la unidad de secado es de vital importancia contar con las propiedades físicas de la solución, del producto y del agente de secado (aire). EL **Cuadro C.2**, resume todas las propiedades requeridas.

Cuadro C.2. Propiedades físicas.

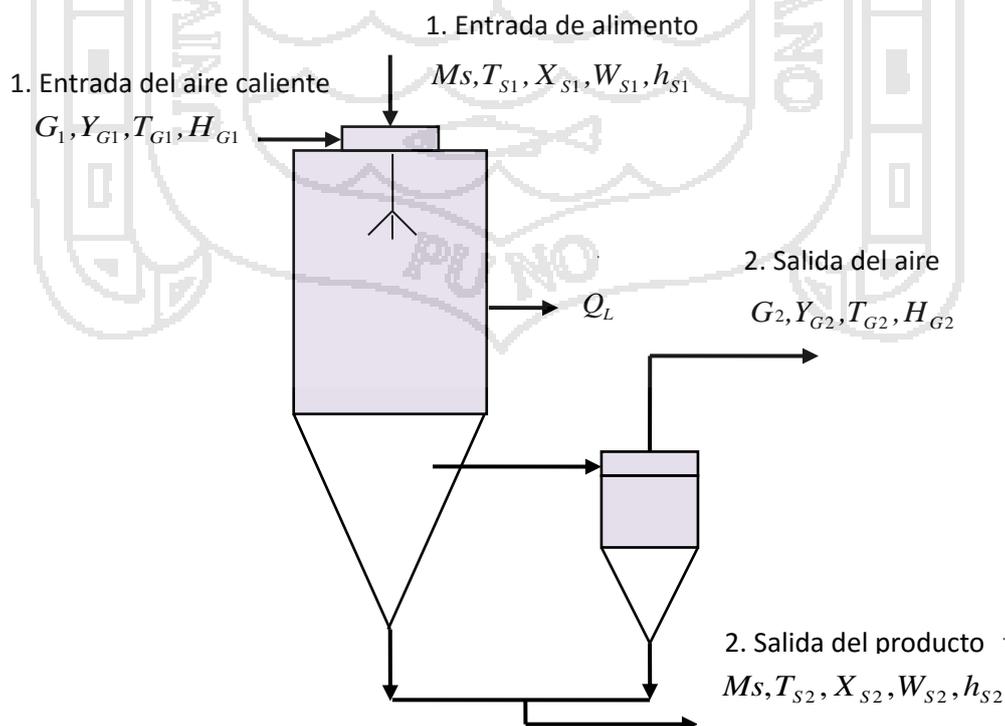
Calor específico de vapor de agua (91°C)	1,875 KJ/Kg
Calor latente de vaporización (91°C)	2502 KJ/Kg
Calor específico del aire (10°C)	1.005 KJ/Kg
Calor específico del agua (20°C)	4,182 KJ/Kg
Densidad de la leche	1100 kg/m ³
Viscosidad de la l eche	1,6314 E-3 Pa.s
Tensión superficial de la leche	55,3 E-3 N/m
Calor específico de leche en polvo	1,675 KJ/Kg

FUENTE: (MENDOZA, 1995)

2. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA DEL SECADOR.

Para realizar los balances de materia y energía disponemos de la siguiente **información:** El valor de la humedad absoluta del aire determinada en el **Anexo 3**, las condiciones de operación fijada y descrita en el **Cuadro C.1** y las ecuaciones para de diseño descrito en la bibliografía.

Figura A-2. Esquema de balance de materia y energía.



A. Balance de Masa: Base 1 hora**Cálculos preliminares:**

Datos:

Solución a secar:

Leche

Porcentaje de humedad en la alimentación: 80% o $X_{w1} = 0.8$.Porcentaje de sólidos en la alimentación (base seca): 20% o $X_{s1} = 0.2$.Producción de polvo seco con 5% de humedad ($X_{w2} = 0.05$): $M_p = 1.5 \text{ kg/h}$

- Cálculo de masa de sólido seco, M_s (kilogramos de sólido seco / h).

$$M_s = M_p [1 - X_{w2}] \quad \text{Ecuación (1a)}$$

$$M_s = 1.5 \times [1 - 0.05]$$

$$M_s = 1.425 \text{ kg/h}$$

- Cálculo de flujo de alimentación en forma líquida, F (kg/h)

$$F = \frac{M_s}{X_{s1}} \quad \text{Ecuación (2a)}$$

$$F = \frac{0.95}{0.20} = 7.125 \text{ kg/h}$$

- Cálculo del contenido de humedad, W_s ($\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg sólido seco}$)

Humedad en la alimentación:

$$W_{s1} = \frac{X_{w1}}{(1 - X_{w1})} \quad \text{Ecuación (3a)}$$

$$W_{s1} = \frac{0.8}{(1 - 0.8)} = 4 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg sólido seco}$$

Humedad en el producto final:

$$W_{s2} = \frac{X_{w2}}{(1 - X_{w2})} \quad \text{Ecuación (4a)}$$

$$W_{s2} = \frac{0.05}{(1 - 0.05)} = 0.0526 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg sólido seco}$$



- Cálculo del agua evaporada, M_{evap} ($kg H_2O/h$)

$$M_{evap} = Ms[W_{S1} - W_{S2}] \quad \text{Ecuación (5a)}$$

$$M_{evap} = 1.425 [4 - 0.0526] = 5.625 \text{ kg / h}$$

Resumen:

Cuadro C.3. Resumen de datos para la fase bombeable.

CONDICIONES DE ENTRADA	CONDICIONES DE SALIDA
$M_s(kg / h) = 1,425$	$M_s(kg / h) = 1,425$
$W_{S1} (kgH_2O/kg \text{ solido seco}) = 4$	$W_{S2} (kgH_2O/kg \text{ solido seco}) = 0,0526$
$T_{S1} (^\circ C) = 30 \text{ }^\circ C$	$T_{S2} \text{ }^\circ C = 91 \text{ }^\circ C \text{ (*)}$
$X_{W1} = 0.8 \text{ (80\% base húmeda).}$	$X_{W2} = 0.05 \text{ (5\% base húmeda).}$
$X_{S1} = 0.2 \text{ (20\% base seca).}$	$X_{S2} = 0.95 \text{ (95\% base seca).}$

(*) SUPONIENDO QUE ES IGUAL A LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE.

Cuadro C.4. Resumen de datos para la fase gas (aire de secado).

CONDICIONES DE ENTRADA	CONDICIONES DE SALIDA
$G_1 (kg / h) = ?$	$G_2 (kg / h) = ?$
$T_{G1} (^\circ C) = 200 \text{ }^\circ C$	$T_{G2} (^\circ C) = 91 \text{ }^\circ C$
$T_{bs} (^\circ C) = 20 \text{ }^\circ C$	$Y_{G2} (kgH_2O/kg \text{ aire}) = ?$
$Y_{G1} (kgH_2O/kg \text{ aire}) = 0.01589 \text{ (*)}$	

(*) Carta psicrométrica a $P = 63.0593 \text{ KPa}$, $T_{bs} = 23 \text{ }^\circ C$

Balance de masa total: Ec. (3) de bibliografía.

$$M_s(W_{S1} - W_{S2}) = G(Y_{G2} - Y_{G1}) \quad \text{Ecuación (6a)}$$

Reemplazando datos en la ecuación (6a):

$$1.425(4.0 - 0.0526) = G(Y_{G2} - 0.01589)$$

$$5.625 = G(Y_{G2} - 0.01589) \quad \text{Ecuación (7a)}$$

B. Balance de Energía:

Cálculos preliminares:

Datos:

$$Cp_s = 1.675 \text{ kJ/kg}$$

$$Cp_{H_2O} = 4.182 \text{ kJ/kg}$$

$$Cp_v = 1.875 \text{ kJ/kg}$$

$$Cp_G = 1.005 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{ref} = 0 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (Valor supuesto)}$$

$$\Delta H_{V(ref)} = 2502 \text{ kJ/kg}$$

$$Y_{G1} = 0.01589 \text{ (kg } H_2O/\text{kg aire seco)}$$

Ecuaciones (6) y (7) de la bibliografía

$$H_G = (1.005 + 1.88Y_G)(T - T_{ref}) + [Cp_v(T - T_{ref}) + \Delta H_{V(ref)}] Y_G \quad \text{Ecuación (8a)}$$

$$hs = (Cp_s + W_s Cp_{H_2O})(T - T_{ref}) \quad \text{Ecuación (9a)}$$

• **Entalpia del aire que ingresa a la cámara de secado:**

En la ecuación (8a):

$$H_{G1} = (1.005 + 1.88Y_{G1})(T_{G1} - T_{ref}) + [Cp_v(T_{G1} - T_{ref}) + \Delta H_{V(ref)}] Y_{G1}$$

$$H_{G1} = [1.005 + 1.88(0.01589)](200 - 0) + [1.875(200 - 0) + 2502]0.01589$$

$$H_{G1} = 252,69 \text{ kJ/kg}$$

• **Entalpia del aire a la salida de la cámara de secado:**

En la ecuación (8a):

$$H_{G2} = (1.005 + 1.88Y_{G2})(T_{G2} - T_{ref}) + [Cp_v(T_{G2} - T_{ref}) + \Delta H_{V(ref)}] Y_{G2}$$

$$H_{G2} = (1.005 + 1.88Y_{G2})(90 - 0) + [1.875(90 - 0) + 2502] Y_{G2}$$

$$H_{G1} = 91.455 + 2843.705 Y_{G2}$$

• **Entalpia de la alimentación líquida que entra al secador:**

En la ecuación (9a):

$$hs_1 = (Cp_s + W_{s1} Cp_{H_2O})(T_{s1} - T_{ref})$$

$$h_{s1} = [1.675 + (4.0)(4.182)](30 - 0)$$

$$h_{s1} = 552.09 \text{ kJ/kg}$$

- **Entalpia del producto que abandona el secador:**

En la ecuación (9a):

$$h_{s2} = (Cp_s + W_{s2} Cp_{H_2O})(Ts_2 - T_{ref})$$

$$h_{s2} = [1.675 + (0.0526)(4.182)](90 - 0)$$

$$h_{s2} = 172.45 \text{ kJ/kg}$$

Balance de Energía:

Reemplazando los resultados de los cálculos preliminares en la **Ecuación (5)** de la bibliografía.

Energía que ingresa = Energía que sale + Energía perdida

$$GH_{G1} + Msh_{s1} = GH_{G2} + Msh_{s2} + Q_L \quad \text{Ecuación (10a)}$$

$$G(252.69) + (1.425)(552.09) = G(91.455 + 2843.705Y_{G2}) + (1.425)(172.443) + Q_L$$

Suponiendo una condición adiabática: $Q_L = 0$ Y simplificando la ecuación:

$$G[252.69 - 91.455 - 2843.705Y_{G2}] = 1.425 \times [172.443 - 552.09]$$

$$252.69G - 91.45G - 2843.705Y_{G2}G = -540.98$$

$$161.23G - 2843.705Y_{G2}G = -540.98 \quad \text{Ecuación (11a)}$$

De la ecuación (7a)

$$5.625 = G(Y_{G2} - 0.01589)$$

$$Y_{G2}G = 5.625 + 0.01589G$$

Reemplazando $Y_{G2}G$ en la ecuación (11a):

$$161.23G - 2843.705[5.625 + 0.01589G] = -540.98$$

$$161.23G - 15995.84063 - 45.1865G = -540.98$$

$$116.049G = 15454.86$$

$$G = 133,175 \text{ kg aire seco / h}$$

Considerando un factor de seguridad de 20%:

$$G = 1.20 \times 133.175$$

$$G = 159.81 \text{ kg aire seco/h}$$

Cálculo de la carga térmica en el calefactor.

$$Q = G \times C_{pG}(T_{G1} - T_a) \quad \text{Ecuación (12a)}$$

$$Q = 159.81 \times 1.005 (200 - 23)$$

$$Q = 28909.769 \text{ kJ/h} = 8.03 \text{ kW}$$

Considerando un factor de seguridad de 20%, por pérdida de calor a través de la superficie del calefactor y del equipo:

$$Q_r = 1.20 \times 8.03 \text{ kW}$$

$$Q_r = 9.64 \text{ kW} \approx 10.0 \text{ kW}$$

3. DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO

a. CÁLCULOS PRELIMINARES.

- **Flujo de aire seco, que ingresa a la cámara:**

$$G = 159.81 \text{ kg aire seco/h}$$

- **Cálculo del caudal de aire extraído:**

$$T_{G2} = 91 \text{ °C} \Rightarrow \rho_{\text{aire}} = 0.973 \text{ kg/h}$$

$$Q_{\text{aire extraído}} = \frac{G}{\rho_{\text{aire}}}$$

Ecuación (13a)

$$Q_{\text{aire extraído}} = \frac{159.81}{0.973}$$

$$Q_{\text{aire extraído}} = 164.245 \text{ m}^3/\text{h}$$

- **Cálculo de caudal de vapor de agua evaporada:**

$$T_{G2} = 91\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow \rho_{\text{aire}} = 0.973\text{ kg/h}$$

$$Q_{\text{vapor de agua}} = \frac{M_{\text{evap}}}{\rho_{\text{vapor de agua}}} \quad \text{Ecuación (14a)}$$

$$Q_{\text{vapor de agua}} = \frac{5.625}{0.603}$$

$$Q_{\text{vapor de agua}} = 9,328\text{ m}^3/\text{h}$$

• **Cálculo de caudal total:**

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{aire extraido}} + Q_{\text{vapor de agua}} \quad \text{Ecuación (15a)}$$

$$Q_{\text{total}} = 164.245 + 9.328$$

$$Q_{\text{total}} = 173.573\text{ m}^3/\text{h} = 0.0482\text{ m}^3/\text{s}$$

b. CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA CÁMARA DE SECADO.

El diámetro de la cámara de secado, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{\text{total}} = v_{cs} \times A_{fcs} \quad \text{Ecuación (16a)}$$

Despejando el área del flujo es:

$$A_{fcs} = \frac{\dot{Q}_{\text{total}}}{v_{cs}} \quad \text{Ecuación (17a)}$$

Tenemos también que el área de flujo es:

$$A_{fcs} = \frac{\pi}{4} D_{CS}^2 \quad \text{Ecuación (18a)}$$

De donde se despeja D_{CS} :

$$D_{cs} = \sqrt{\frac{4A_{fcs}}{\pi}} \quad \text{Ecuación (19a)}$$

La única incógnita para determinar el diámetro de la columna es la velocidad de circulación del aire a través de la cámara de secado. De la referencia bibliográfica, se estima una velocidad $v_{cs} = 0,4 \text{ m/s}$

Se reemplaza en la ecuación (17a).

$$A_{fcs} = \frac{0.0482}{0.4}$$

$$A_{fcs} = 0.12 \text{ m}^2$$

El valor hallado del área de flujo se reemplaza en la ecuación (19a) para determinar el diámetro de la cámara de secado (D_{cs}):

$$D_{cs} = \sqrt{\frac{4(0.012)}{\pi}}$$

$$D_{cs} = 0.392 \text{ m} \approx 0.4 \text{ m}$$

c. CÁLCULO DE LA ALTURA DE LA CÁMARA DE SECADO

Para hallar la altura (H) en metros se supone que las gotas caen en la misma velocidad del aire y se asume un tiempo de secado de 4 segundos ($t_s = 4 \text{ s}$).

$$Z = v_{cs} \times t_s = H \quad \text{Ecuación (20a)}$$

Reemplazando datos en la ecuación (20a)

$$H = 0.4 \times 4$$

$$H = 1.6 \text{ m}$$

Tenemos referencia de la bibliografía la relación entre la altura y el diámetro de la cámara de secado, con flujo paralelo y boquilla atomizadora en la cima de 3:1 a 4:1 (altura/diámetro cámara), por lo tanto, el diámetro y la altura calculados, están en la relación 3:1.

4. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS EQUIPOS AUXILIARES EN EL ATOMIZADOR

a. CICLÓN SEPARADOR.

Datos:

$$\dot{Q}_{total} = 0.0482 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_{G2} = 91 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow \rho_{aire} = 0.973 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Según el Handbook de Perry/Chilton es recomendable que la velocidad (v_c) del gas que entra al ciclón este en el rango de 6 – 20 m/s

- Calculo del diámetro de ciclón D_c :

Planteamos $v_c = 14 \text{ m/s}$

$$A_c = \left(\frac{D_c}{2}\right)\left(\frac{D_c}{4}\right)$$

$$A_c = \left(\frac{D_c^2}{8}\right)$$

$$\left(\frac{D_c^2}{8}\right) = \frac{\dot{Q}_{Total}}{v_c}$$

Despejando D_c :

$$D_c = \sqrt{8 \frac{\dot{Q}_{Total}}{v_c}}$$

$$D_c = \sqrt{\frac{8(0.0482)}{14}}$$

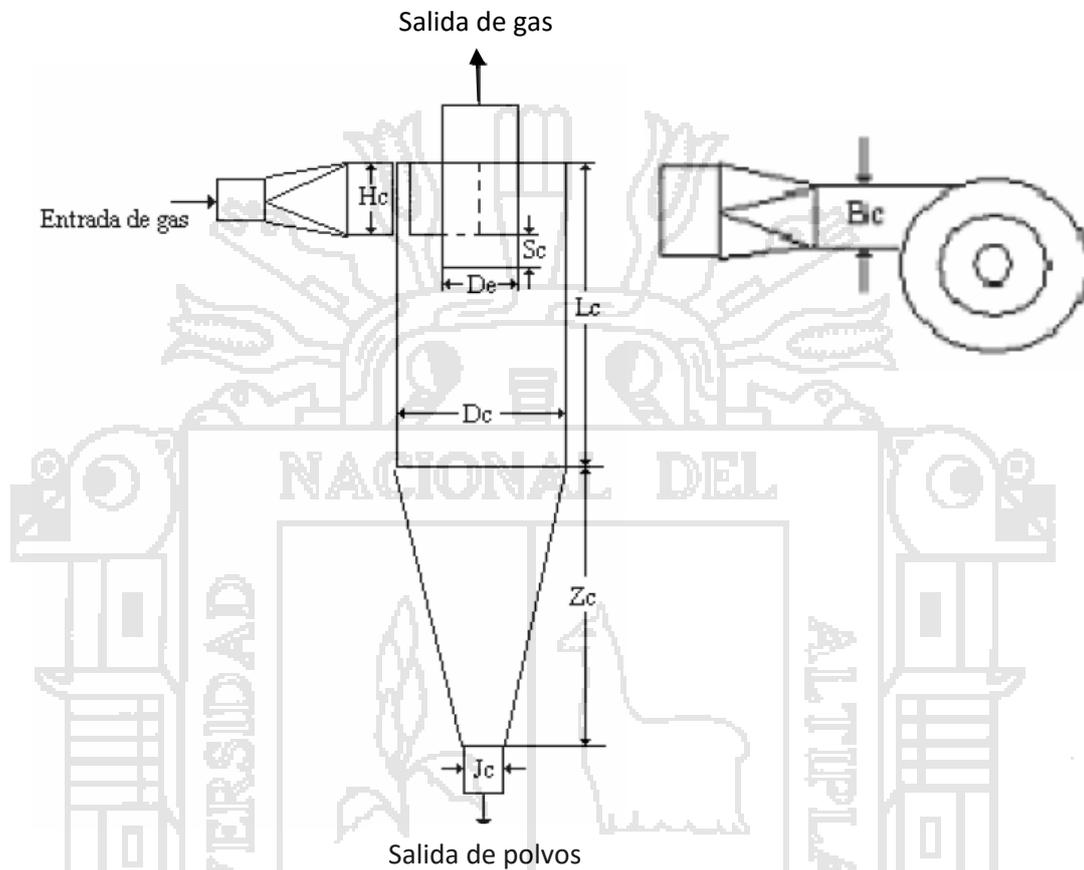
$$D_c = 0.17 \text{ m} = 170 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el valor planteado de v_c es razonable y está dentro del rango establecido:

$$6 \text{ m/s} < (v_c = 14 \text{ m/s}) < 20 \text{ m/s}$$

Esquema del dimensionamiento del Ciclón (**Figura A-3**) y la relación para sus dimensiones (**Cuadro C.5**), según Espinoza & Herrera (2003).

Figura A-3. Esquema del ciclón.



Cuadro C.5. Datos calculados para el Ciclón.

	(cm)
Dc	17
Bc	4.25
De	8.5
Hc	8.5
Lc	34
Sc	2.125
Zc	34
Jc	4.25

b. DISEÑO DE LA TUBERÍA DE TRANSPORTE.

La velocidad recomendada es $v_{LT} = 20 - 25 \text{ m/s}$

Supongamos: $v_{LT} = 22 \text{ m/s}$

$$\dot{Q}_{total} = 0.0482 \text{ m}^3/\text{s}$$

El área de flujo de la tubería de transporte es:

$$A_{LT} = \frac{\dot{Q}_{total}}{v_{LT}} \quad \text{Ecuación (22a)}$$

Se reemplaza datos en la ecuación (22a)

$$A_{LT} = \frac{0.0482}{22}$$

$$A_{LT} = 0.00219 \text{ m}^2$$

Pero, también puede ser representada de la forma siguiente:

$$A_{LT} = \frac{\pi}{4} (D_{iLT})^2 \quad \text{Ecuación (23a)}$$

De donde se despeja D_{iLT} , que viene a ser el diámetro de la tubería de transporte:

$$D_{iLT} = \sqrt{\frac{4(A_{LT})}{\pi}} \quad \text{Ecuación (24a)}$$

Se reemplaza en la ecuación (24a) el valor de A_{LT} hallado inicialmente:

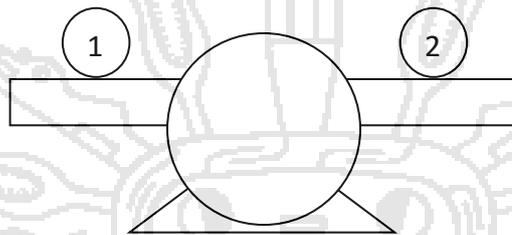
$$D_{iLT} = \sqrt{\frac{4(0.00219)}{\pi}}$$

$D_{iLT} = 0.05 \text{ m} = 50 \text{ mm} \Rightarrow$ Se selecciona el tubo de $2 \text{ pulg} = 50 \text{ mm}$ de OD.

c. DISEÑO DEL EXTRACTOR.

$$\dot{Q}_{total} = 0.0482 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_{G2} = 91 \text{ }^\circ\text{C}$$



Supongamos un $P = 28 \text{ mmHg}$ en el extractor.

$$P_1 = 534 \text{ mmHg (Succión)}$$

$$P_2 = 562 \text{ mmHg (Descargar)}$$

Como $P = 28 \text{ mmHg}$:

$$\frac{28}{534} \times 100\% = 5.24\% \approx 5\% \text{ De presión por toda la pared (suponer flujo incompresible).}$$

Cálculos de densidad.

- Densidad de la succión.

Datos:

$$\bar{M} = 28.97 \text{ kg / kmol}$$

CN = Condiciones Normales: $T_{CN} = 273.15 \text{ K}$ y $P_{CN} = 760 \text{ mmHg}$

$$P_1 = 534 \text{ mmHg}$$

$$\rho_1 = \bar{M} \left(\frac{T_{CN}}{T_{G2}} \right) \left(\frac{P_1}{P_{CN}} \right)$$

Ecuación (25a)

Se reemplaza datos en la ecuación (25a):

$$\rho_1 = (28.97) \left(\frac{273.15}{364.15} \right) \left(\frac{534 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} \right) \left(\frac{1 \text{ kmol}}{22.414 \text{ m}^3} \right)$$

$$\rho_1 = 0.6812 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- Densidad de la succión.

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)$$

Ecuación (26a)

$$\rho_2 = 0.6812 \left(\frac{562}{534} \right)$$

$$\rho_2 = 0.7169 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- Densidad media:

$$\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

Ecuación (27a)

$$\rho_m = \frac{0.6812 + 0.7169}{2}$$

$$\rho_m = 0.6991 \text{ kg} / \text{m}^3 \approx 0.7 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Balance de Energía entre los puntos 1 y 2:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + nWs = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + \sum F$$

$$\text{Si } \sum F = 0$$

$$nWs = \frac{p_2 - p_1}{\rho_m}$$

Ecuación (28a)

Se reemplaza los datos y resultados calculados en la ecuación (28a):

$$nWs = \frac{(562 - 534) \text{ mmHg}}{0.70 \text{ kg} / \text{m}^3} \left(\frac{1 \text{ atm}}{760 \text{ mmHg}} \right) \left(\frac{101325 \text{ N} / \text{m}^2}{1 \text{ atm}} \right)$$

$$nWs = 5332,89 \text{ J} / \text{kg}$$

Considerando eficiencia del 60% ($n = 0.6$):

$$W_s = \frac{5332.89}{0.6}$$

$$W_s = 8888.158 \text{ J/kg}$$

Se calcula la potencia del extractor:

$$Pot. = W_s(m) \quad \text{Ecuación (29a)}$$

Donde:

$$m = \dot{Q}(\rho_m) \quad \text{Ecuación (30a)}$$

Reemplazando datos (30a) en la ecuación (29a):

$$Pot. = 8888.158(0.0482)(0.70)$$

$$Pot. = 299.979 \text{ J/s} = 0.4 \text{ hp}$$

\therefore Se aproxima a 1/2 HP (disponible en el mercado)

Presión Estática:

- En el Ciclón : $\Delta P = 130 \text{ mmcda}$

- En accesorios : $\Delta P = 35 \text{ mmcda}$

- En tuberías : $\Delta P = \underline{63 \text{ mmcda}}$

$$\Delta P_T = 228 \text{ mmcda} \approx 230 \text{ mmcda}$$

d. CÁLCULO DEL ESPESOR DEL AISLANTE PARA LA CÁMARA DE SECADO.

Para calcular el espesor del aislante (para la pared de la cámara de secado), asumimos que la temperatura de secado, y temperatura del exterior del medio, son 200°C y 20 °C respectivamente. En este sentido, para realizar el cálculo correspondiente, nos regimos en la ecuación siguiente:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{e_n}{K_n} + \frac{1}{h_i}} \quad \text{Ecuación (31a)}$$

Donde:

h_e y h_i : Coeficientes globales de transmisión de calor por convección $Kcal / h.m^2.°C$

e_n : Espesor de cada uno de los materiales que componen el cerramiento (m)

K_n : Conductividad térmica de cada uno de los materiales $Kcal / h.m^2.°C$

Para obtener el valor de U , es preciso utilizar el **Cuadro C.6** siguiente:

Cuadro C.6. Coeficiente de transferencia de calor.

$\Delta T(^{\circ}C)$	$U = \left(\frac{Kcal}{h.m^2.°C} \right)$
>60	0.15
50	0.20
40	0.25
30	0.30
20	0.35
10	0.40
0	0.45
-10	0.50
-20	0.55
-30	0.60
-40	0.65
-50	0.70
<60	0.75

FUENTE: PILLIGUA (2006).

Para utilizar el Cuadro precedente, necesitamos conocer el valor de ΔT° , el cual lo determinamos aplicando la siguiente ecuación:

$$\Delta T^{\circ} = T_{med} - T_{int} \tag{Ecuación (32a)}$$

Donde:

T_{med} : Temperatura exterior del medio ($^{\circ}C$).

T_{int} : Temperatura interior de la cámara ($^{\circ}C$).

Los valores de h (coeficiente de convección), están dados de acuerdo a la disposición de la cámara y/o tanque, como veremos a continuación (Pilligua 2006).

$$h_i = 10 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}; \text{ Pared en contacto con la cámara de secado.}$$

$$h_i = 20 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}; \text{ Pared en contacto con el aire exterior.}$$

Para determinar el espesor de aislante a colocar en la pared de la cámara de secado, se consideraron las propiedades térmicas de la “lana de roca mineral”; así como, de las plancha de acero inoxidable por la que estaría conformada la pared de la cámara: Una plancha interior de acero inoxidable (AISI 304); y, otra plancha de acero inoxidable (AISI 304) en el exterior. Tanto los espesores y la conductividad térmica de los materiales mencionados en el párrafo precedente para la conformación de las paredes de la cámara de secado, se presentan en el **Cuadro C.7**.

Cuadro C.7. Espesor y conductividad térmica de los materiales empleados.

Materiales empleados en la pared de la cámara	Espesor (m)	Conductividad $\left(\frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C} \right)$
Plancha de acero	0.005	17
Lana de roca	e_n	0.03
Plancha de acero	0.005	17

- **Cálculo de espesor del aislante para la cámara de secado.**

Como ya se explicó, el cálculo de la ΔT° , utilizando la T_{med} con la T_{int} , es:

$$\Delta T^{\circ} = 20 - 200 = -180^{\circ}C$$

Con el valor de ΔT° determinado ($180^{\circ}C$), obtenemos del **Cuadro C.6**, el valor del coeficiente transferencia de calor; siendo este, el siguiente:

$$U = 0.75 \left(\frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C} \right)$$

Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación (31a), tenemos:

$$0.75 = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0.005}{17} + \frac{e_n}{0.03} + \frac{0.005}{17} + \frac{1}{20}}$$

$$e_n = 3.55 \Rightarrow 4 \text{ cm}$$

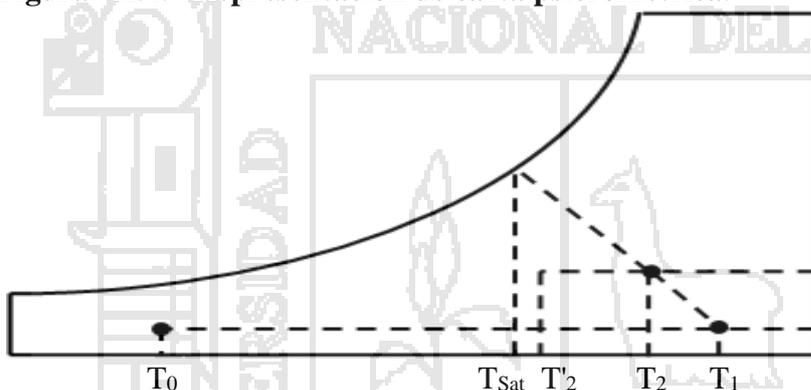
ANEXO 5. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA Y TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL EQUIPO.

CÁLCULO DEL EFICIENCIA TERMICA

Se necesita conocer las siguientes temperaturas:

- Temperatura de aire de entrada del secador ($T_{G1} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Temperatura del aire a la salida del secador ($T_{G2} = 91 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Temperatura del aire atmosférico ($T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Temperatura de saturación adiabática a la temperatura que entra al secador. Se emplea la carta psicrométrica ($T_{sat} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$)

Figura A.4. Representación de carta psicrometrica.



Eficiencia térmica máxima (caso ideal).

Ecuación (27) de la Bibliografía.

$$\eta_{max} = \frac{T_{G1} - T_{sat}}{T_{G1} - T_a} \times 100\% \quad ; \quad \eta_{max} = \frac{200 - 45}{200 - 20} \times 100\% \quad ; \quad \eta_{max} = 86.11\%$$

Eficiencia térmica Global.

Ecuación (28) de la Bibliografía.

$$\eta_{global} = \frac{T_{G1} - T_{G2}}{T_{G1} - T_a} \times 100\% \quad ; \quad \eta_{global} = \frac{200 - 91}{200 - 20} \times 100\% \quad ; \quad \eta_{global} = 60.56\%$$

Eficiencia evaporativa.

Ecuación (29) de la Bibliografía.

$$\eta_{evap} = \frac{T_{G1} - T_{G2}}{T_{G1} - T_{sat}} \times 100\% \quad ; \quad \eta_{evap} = \frac{200 - 91}{200 - 45} \times 100\% \quad ; \quad \eta_{evap} = 70.32\%$$

CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA:

Ecuación (30) de la Bibliografía.

$$t_s = \frac{V_{CS}}{Q_{total}} \quad \text{Ecuación (33a)}$$

Calculo de volumen de la cámara:

$$V_{CS} = V_{cilint} + V_{iconint}$$

Para determinar el volumen de la cámara, se determina el volumen de cada tramo (que es en forma geométrica) con las siguientes ecuaciones:

- Volumen del cilindro interior:

$$V_{cilint} = \pi r_{cilint}^2 h_{cilint}; \quad V_{cilint} = \pi(0.25)^2(1); \quad V_{cilint} = 0.20m^3$$

- Volumen de tronco de cono interior:

$$V_{consup} = \frac{h_{iconint}}{3} (\pi R_{iconint}^2 + \pi r_{iconint}^2 + \pi R_{iconint} r_{iconint})$$

$$V_{consup} = \frac{0.7}{3} (\pi(0.25)^2 + \pi(0.035)^2 + \pi(0.25)(0.035))$$

$$V_{consup} = 0.051m^3$$

- Volumen de la cámara de secado:

$$V_{CS} = 0.20 + 0.051 = 0.251m^3$$

Seguidamente reemplazamos V_{CS} y Q_{total} ($0.0482 m^3/s$) en la ecuación (33a)

$$t_r = \frac{0.251}{0.0482}$$

$$t_r = 5.2 s$$

Nota: Con ayuda del dispersor de aire es posible obtener un mayor tiempo de residencia que el calculado, con un aproximado de 7 s. En ambos cálculos el tiempo de residencia

($t_r = 5.2$ a 7 s) es mayor que el tiempo de secado planteado ($t_s = 4$ s).

ANEXO 6. NOMENCLATURA.

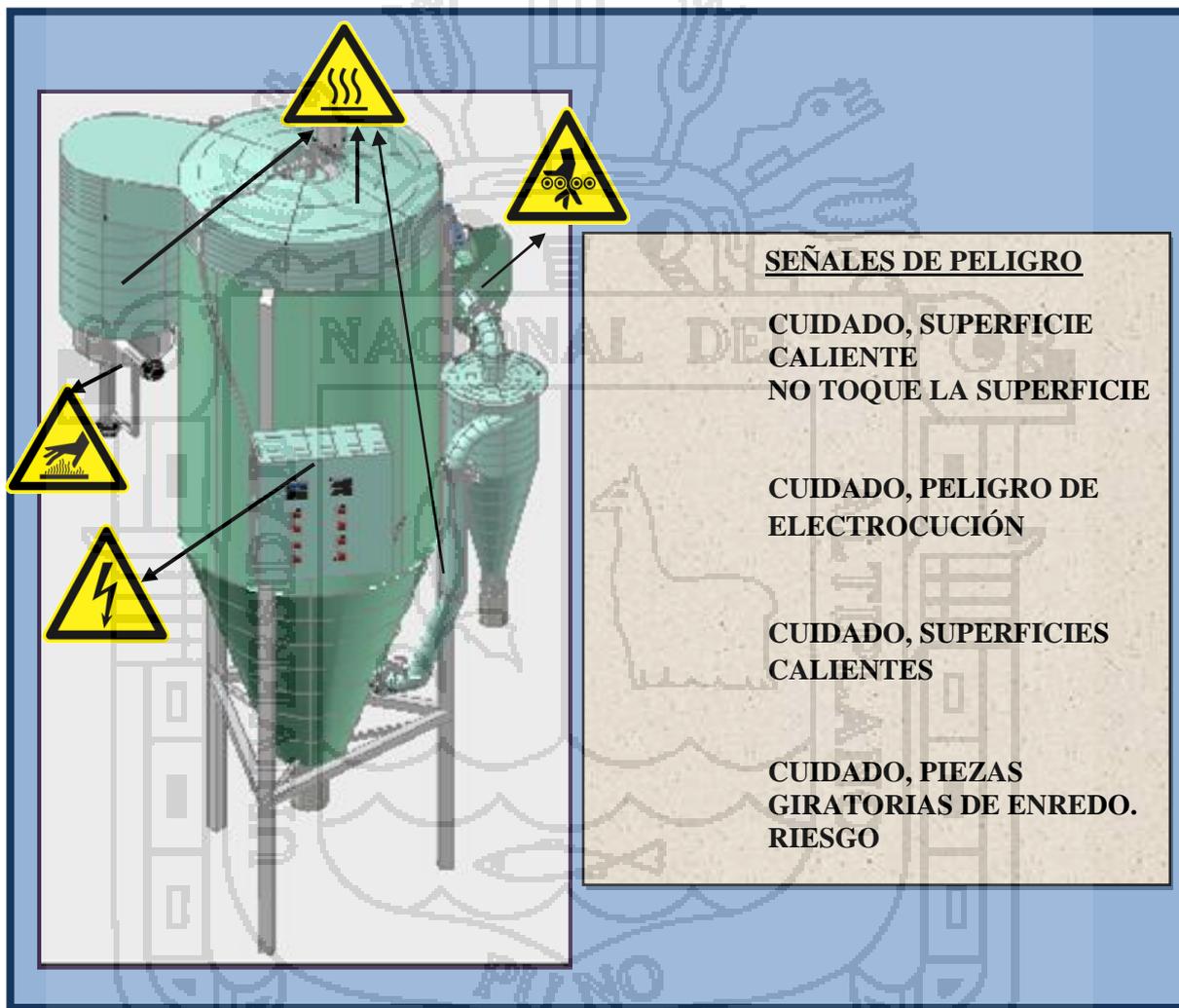
A_{fcs}	Área de flujo de la cámara de secado, (m/s).
A_{LT}	Área de flujo de la tubería de transporte, (m/s).
Cp_{H_2O}	Calor específico del agua, (KJ/Kg).
Cp_s	Calor específico del sólido, (KJ/Kg).
Cp_v	Calor específico del vapor, (KJ/Kg).
Cp_g	Calor específico del aire, (KJ/Kg).
D_c	Diámetro del ciclón, (m).
D_{CS}	Diámetro de la cámara de secado, (m).
D_{iLT}	Diámetro de la tubería de transporte, (m).
F	Flujo total de alimentación, (Kg/h).
g	Aceleración de la gravedad, (m/s^2).
G_1	Flujo de masa de aire que entra al secador, (Kg/h).
G_2	Flujo de masa de aire que sale del secador, (Kg/h).
h_{S1}	Entalpía de alimentación líquida que entra al secador, (KJ/Kg).
h_{S2}	Entalpía del producto que abandona el secador, (KJ/Kg).
$h_{cil inf}$	Altura del cilindro inferior de la cámara de secado, (m).
$h_{cil sup}$	Altura del cilindro superior de la cámara de secado, (m).
$h_{con inf}$	Altura del tronco de cono inferior de la cámara de secado, (m).
$h_{con sup}$	Altura del tronco de cono superior de la cámara de secado, (m).
H	Altura de la cámara de secado, (m).
H_{G1}	Entalpía del aire que ingresa a la cámara, (KJ/Kg).
H_{G2}	Entalpía del aire a la salida de la cámara, (KJ/Kg).
\bar{M}	Peso molecular del aire, (Kg/Kg mol).
M_{evap}	Capacidad de evaporación del agua, (Kg/h).
Ms	Flujo de masa de sólido seco, (Kg/h).
n	Eficiencia del extractor, (%).
η_{max}	Eficiencia térmica máxima, (%).
η_{global}	Eficiencia térmica global, (%).
η_{evap}	Eficiencia térmica evaporativa, (%).
P_{CN}	Presión a condiciones normales, (mmHg).
P_1	Presión en la succión del extractor, (mmHg).
P_2	Presión en la descarga del extractor, (mmHg).
Q	Carga térmica, (Kw).
Q_L	Calor perdido, (Kw).

Q_r	Calor total, (kW)
Q_{total}	Caudal total. (m^3/s).
$r_{cil\ int}$	Radio del cilindro interior de la cámara de secado, (m).
$r_{icon\ int}$	Radio menor del tronco de cono interior de la cámara de secado, (m).
$R_{icon\ int}$	Radio mayor del tronco de cono interior de la cámara de secado, (m).
t_r	Tiempo de residencia, (s).
t_s	Tiempo de secado, (s).
T_a	Temperatura ambiente, ($^{\circ}C$).
T_{CN}	Temperatura a condiciones normales, (K)
T_{G1}	Temperatura del aire de secado a la entrada de la cámara, ($^{\circ}C$)
T_{G2}	Temperatura del aire de secado a la salida de la cámara, ($^{\circ}C$).
T_{ref}	Temperatura de referencia, ($^{\circ}C$).
T_{sat}	Temperatura de saturación adiabática, ($^{\circ}C$).
VC	Velocidad superficial en el ciclón, (m/s).
v_{LT}	Velocidad superficial en la tubería de transporte, (m/s).
v_1	Velocidad de succión del extractor, (m/s).
v_2	Velocidad de descarga del extractor, (m/s).
$V_{cil\ int}$	Volumen del cilindro interior de la cámara de secado, (m^3)
V_{CS}	Volumen de la cámara de secado, (m^3)
$V_{icon\ int}$	Volumen del tronco de cono interior de la cámara de secado, (m^3)
W_S	Trabajo del extractor, (J/Kg).
W_{S1}	Contenido de humedad en la alimentación, (Kg agua/ Kg de sólido seco).
W_{S2}	Contenido de humedad en el producto, (Kg agua/ Kg de sólido seco).
X_{S1}	Porcentaje en peso de sólido en la alimentación, (base seca).
X_{S2}	Porcentaje en peso de sólido en el producto, (base seca).
Y_{G1}	Humedad del aire que entra a la cámara de secado, (Kg agua/ Kg de sólido seco).
Y_{G2}	Humedad del aire que sale de la cámara de secado, (Kg agua/ Kg de sólido seco).
Z	Altura, (m).
Z_1	Altura de la succión del extractor, (m).
Z_2	Altura de la descarga del extractor, (m).
$\Delta H_{V(ref)}$	Calor latente de evaporación, (KJ/Kg).
ρ_{aire}	Densidad de aire extraído, (kg/m^3).
$\rho_{vapor\ de\ agua}$	Densidad del vapor de agua, (kg/m^3).
ρ_m	Densidad media, (kg/m^3).
ρ_1	Densidad en la succión del extractor, (kg/m^3).
ρ_2	Densidad en la descarga del extractor, (kg/m^3).

ANEXO 7. MANUAL DE USO Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO DE SECADO POR ATOMIZACIÓN.

1. PRECAUCIONES ANTES DE LA PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA.

Figura A.5. Esquema de seguridad del secador por Atomización.



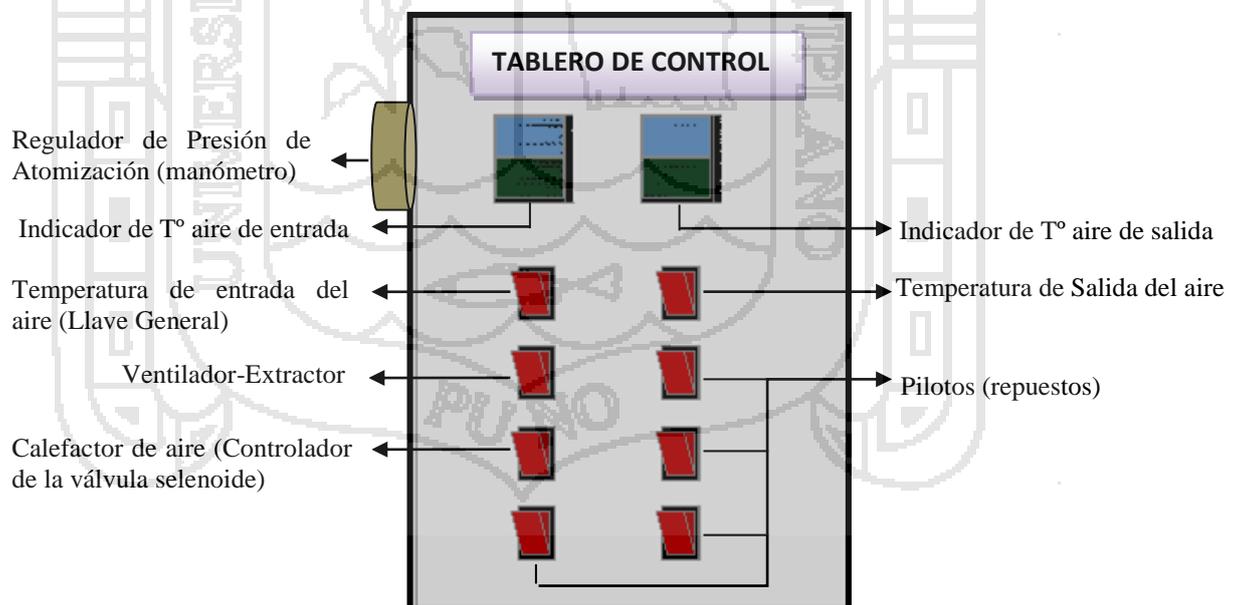
INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD.

- Verificar visualmente las condiciones del equipo de secado, antes de conectar a la toma de fuente de energía de 220 voltios.
- No lave la máquina por fuera con chorros de agua o trapos chorreantes (menos cerca del tablero de control): PELIGRO DE ELECTROCUCIÓN.
- No dañe las etiquetas de reconocimiento aplicadas en la máquina. PELIGRO

- No efectué intervenciones de limpieza/mantenimiento sin haber desconectado la máquina antes: PELIGRO DE ELECTROCUCIÓN.
- No toque la maquina con manos o pies húmedos o mojados: PELIGRO DE ELECTROCUCIÓN.
- No introduzca destornilladores u otros utensilios entre las protecciones o las partes que se mueven: PELIGRO.
- No tire el cable de alimentación para desconectar la maquina: PELIGRO DE ELECTROCUCIÓN.
- En caso de avería, mal funcionamiento, no intente arreglarlos o intervenciones directas. Diríjase solo al servicio de asistencia técnica o a personal calificado. PELIGRO.
- No utilice el aparato en ambientes explosivos (presencia de gas en el aire): PELIGRO DE EXPLOSIÓN.
- Una vez en marcha el equipo, verificar **visualmente** el perfecto estado de funcionamiento del controlador de temperatura y el ventilador.

2. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.

Figura A.6. Esquema del Tablero de control.



ARRANQUE GENERAL.

Paso 1. Para arrancar la cámara se debe cerrar la tapa superior de la cámara.

- Paso 2.** Conectar el enchufe general del equipo y del compresor (ajustar la salida de presión a 80 psi) a la toma de fuente de energía de 220 voltios.
- Paso 3.** Encender el piloto de quemador de gas (ajustar el piloto cerca al quemador de gas).
- Paso 4.** Encender el tablero de control activando la temperatura de entrada (llave general).
- Paso 5.** Programar en el termostato la temperatura de entrada de aire de secado y encender el calefactor en el tablero, de manera que pueda activar el funcionamiento del quemador y el selenoide (regular en el quemador la llama de fuego de 1 a 1.5 cm aproximadamente).
- Paso 6.** Encender el Ventilador-Extractor en el tablero de control (Regular la salida de aire a la mitad). Tomar tiempo de calentamiento.
- Paso 7.** Colocar los frascos de recolección de producto tanto de la base de la cámara como del ciclón. (Verificar que estén secos).
- Paso 8.** Una vez llegada la temperatura deseada (de entrada 160°C y salida de aire 75 a 80°C aprox.). Regular la presión de atomización a 35 psi aprox. (dependiendo del proceso de secado).
- Paso 9.** Colocar la tobera neumática (regulando previamente el flujo de alimentación y entrada de aire) en la cima de la cámara y ajustarla en el soporte y proceder a la alimentación de la solución a secar.
- Paso 10.** Verificar la salida de alimento en los frascos golpeando levemente en la base cónica del ciclón para mejorar la caída de alimento en el frasco.
- Paso 11.** Controlar la Temperatura de aire de salida: cerrando más la salida de caudal de aire, bajando la temperatura de entrada de aire o variando el flujo de alimentación.

PARADA GENERAL. Para detener el equipo, luego de que ha estado funcionando correctamente, se seguirán los siguientes pasos lo más rápido posible:

- Paso 1.** Cerrar la entrada de presión de atomización y sacar la boquilla de atomización para dar mantenimiento (Limpiarla).
- Paso 2.** Apagar simultáneamente el ventilador-extractor y el calefactor de aire en el tablero de control.

- Paso 3.** Cerrar la llave del quemador, del piloto y el balón de gas. Abrir la tapa de la cámara para dejar enfriar (con guantes).
- Paso 4.** Desconectar el enchufe general del equipo y del compresor, antes de realizar las etapas sucesivas para finalizar el proceso de secado por atomización.
- Paso 5.** Retirar los frascos con el contenido del producto seco y proceder a la recuperación del producto de la tubería de transporte y del ciclón separador.

3. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA.

Mantenimiento Ordinario. Solo personal especializado y autorizado por el fabricante tiene que efectuar el mantenimiento. Utilizar los equipos correctos (andamios móviles, escaleras con parapeto o apoyabrazos, etc.), según las necesidades.

Control después de 20 días de funcionamiento. Comprobar los puntos siguientes:

- Control de limpieza del VENTILADOR-EXTRACTOR.
- Control de todo los TORNILLOS de las conexiones eléctricas.
- Control de limpieza de la TOBERA NEUMÁTICA.
- Control general del FUNCIONAMIENTO.

Controles cada tres meses.

- Control de limpieza del VENTILADOR-EXTRACTOR.
- Control de limpieza de la TOBERA NEUMÁTICA.
- Control de todo los TORNILLOS de las conexiones eléctricas.

Controles cada tres meses.

- Control integridad y eficiencia de la tobera neumática y mangueras de conexión.
- Control de limpieza Integridad y eficiencia del ventilador-extractor.
- Control integridad de la distribuidor de aire y el calefactor.
- Control integridad y eficiencia de las empaquetaduras de la puerta y conductos.
- Control integridad de las abrazaderas que aseguran las tuberías de transporte.
- Control integridad y eficiencia del quemador y conexiones de gas.
- Control integridad de los cables eléctricos y de los componentes eléctricos.

- Control de dodo tornillos de las conexiones eléctricas.
- Control general del funcionamiento.

4. LIMPIEZA DEL EQUIPO DE SECADO.

Efectué siempre las operaciones de limpieza y/o mantenimiento con la máquina parada, desconectada de la alimentación eléctrica y teniendo en cuenta que todas las partes estén a temperatura ambiente.

Limpieza de las Superficies Internas: Partes internas de la Cámara de secado, tubería de transporte, Ciclón separador y tapa superior (Superficies de acero Inoxidable).

- Periódicamente, cuando es necesario, utilizando agua caliente y productos detergentes, esterilizarte de normal utilización doméstica.
- No utilizar solventes, productos detergentes abrasivos, ácidos o perfumados. No utilizar chorros de agua. No utilizar cepillos metálicos.
- Desmontar el Ciclón separador y la tubería de transporte y Limpie las superficies internas con esponjas de soluciones desengrasante/detergente caliente. Enjuague con abundante agua.
- Limpie la pared interna de la cámara de secado con esponjas empapada (no chorreante) de soluciones desengrasante/detergente caliente. Enjuagar cuidando que no caída agua en el tablero de control. Proceder del mismo modo con la parte interna de la tapa de la cámara de secado.

Limpieza de las Superficies Externas: Partes externas de la Cámara de secado, tubería de transporte, Ciclón separador, tapa superior y tablero de control (Superficies de acero Inoxidable).

- Mismas precauciones utilizadas para limpiar el interno. **No utilizar** Alcohol, solventes, tricloroetileno. Especialmente en el tablero de control.
- Limpie las superficies con una esponja empapada (no chorreante) de solución desengrasante / detergente caliente. Enjuague
- Seque cada vez todas superficies con una bayeta seca de manera detenida.

ANEXO 8. CERTIFICADO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE LA MATERIA PRIMA Y PRODUCTO FINAL

MINISTERIO DE AGRICULTURA
 INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
 LABORATORIO DE ANALISIS
 ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
 ANEXO SALCEDO
 Ofic. Principal: Av La Molina 1981-La Molina Lima

Instituto Nacional de Innovación Agraria
 Estación Experimental Illpa - Puno

CERTIFICADO DE ANALISIS N° 1932LP-2012

SOLICITANTES
 DIRECCION
 PROCEDENCIA
 PRODUCTO
 TIPO DE ANALISIS
 N° DE ANALISIS
 FECHA DE RECEPCIÓN
 FECHA DE CERTIFICACIÓN

: Jovana Canaza Camargo.
 Lisset Calla Chacón
 :
 : Puno.
 : Leche Polvo.
 : Análisis Físico Químico.
 : 03.
 : 13 de Diciembre del 2012.
 : 14 de Diciembre del 2012.

Claves Usuario	C=25% T=30°C	C=35% T=30°C	M4
Determinaciones	Resultados	Resultados	Resultados
Proteína (N x 6.25) %	24,36	24,27	26,20
Fibra %	-	-	-
Cenizas %	-	-	-
Grasa %	27,32	27,30	27,50
ELN %	45,86	46,42	45,11
Energía (Kcal/100g)	521,63	517,24	532,76
Acidez %	0,10	0,08	0,04
Impurezas macroscópicas %	0,00	0,00	0,00

Métodos utilizados en el Laboratorio:

- NTP 209.262 Alimentos cocidos de reconstitución instantánea Determinación de Proteína Método Kjeldahl (F.C. 6.38).
- NTP 209.263 Alimentos cocidos de reconstitución instantánea Determinación de Grasa Método Gravimétrico.
- NTP 209.264 Alimentos cocidos de reconstitución instantánea Determinación de Humedad Método Por diferencia.
- NTP 209.265 Alimentos cocidos de reconstitución instantánea Determinación de Cenizas Método Gravimétrico.
- NTP 209.266 Alimentos cocidos de reconstitución instantánea Determinación de Acidez Método Volumétrico.
- NTP 209.269 Alimentos cocidos de reconstitución instantánea Determinación de Fibra Método Weendy.

Conclusiones:
 La muestra analizada de Leche en Polvo CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales.

Nota:
 Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento.

ING° JORGE CANIHUA ROJAS
 Jefe Laboratorio Análisis
 SALCEDO

ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Los resultados son aplicables a estas muestras.

ILLPA : Carretera Puno - Juliaca , Km. 22 Telf. (051) 62-2779

PUNO (Sede): Rinconada de Salcedo, Telefax (051) 36-3812 Cel. (051) 62-2760

e-mail : illpa@inia.gob.pe. jcanihua@inia.gob.pe.

ANEXO 9. GALERIA DE FOTOGRAFÍAS.

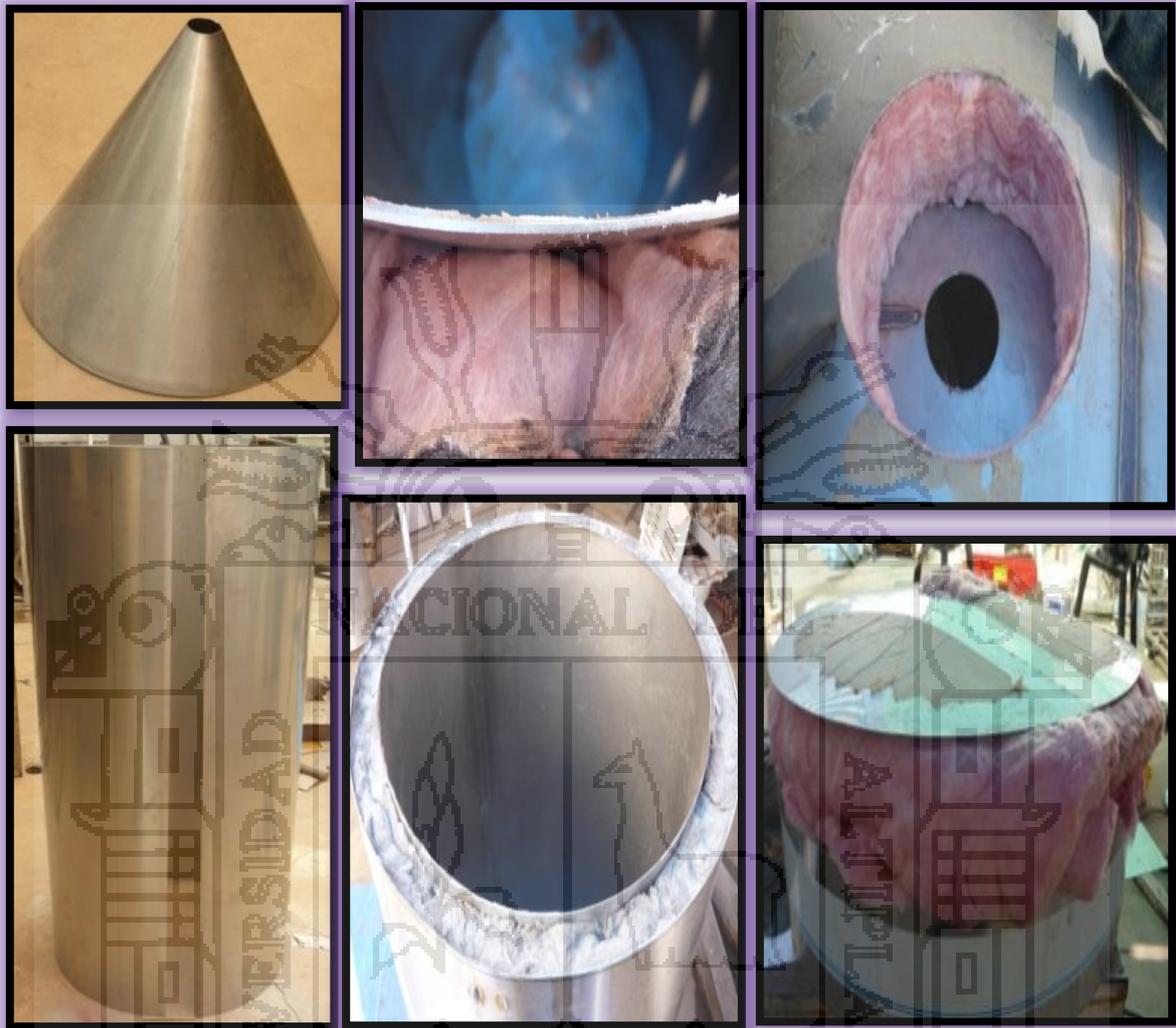


FOTO 1. CONSTRUCCION DE LA CAMARA DE SECADO (AGOSTO, 2011)



FOTO 2. CONSTRUCCION DEL CALEFACTOR DE AIRE (AGOSTO, 2011)



FOTO 3. MONTAJE DEL EQUIPO DE SECADO (JULIO, 2012)



FOTO 4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE SECADO POR ATOMIZACIÓN (NOVIEMBRE, 2012)



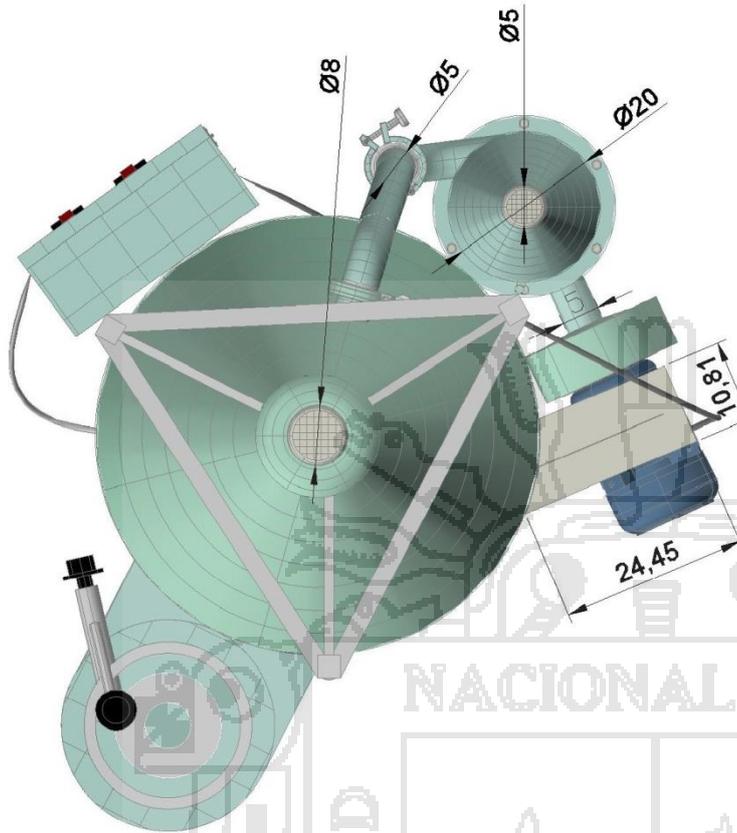
FOTO 5. DETERMINACION DE HUMEDAD Y TAMAÑO DE PARTICULA
(DICIEMBRE, 2012)



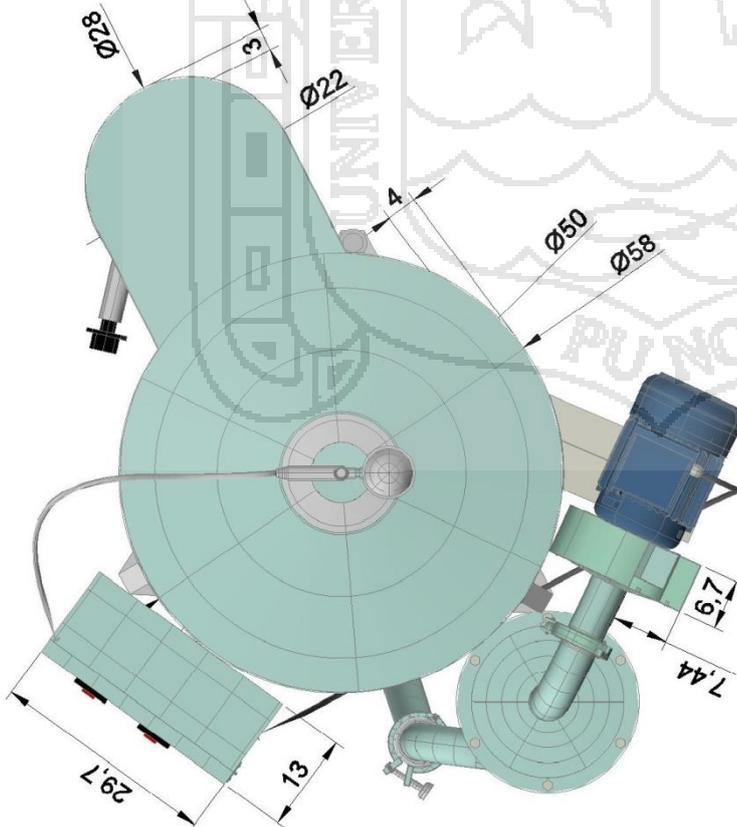
FOTO 6. VISTA GENERAL DEL EQUIPO DE SECADO POR ATOMIZACIÓN
(DICIEMBRE, 2012)

ANEXO 10. PLANOS ELABORADOS EN EL PROGRAMA AUTOCAD.





VISTA INFERIOR
ESC. 1/10



VISTA SUPERIOR
ESC. 1/10

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

TESIS: CONSTRUCCION DE SECADOR POR ATOMIZACION

LAMINA:

PLANO: VISTAS EN PLANTA E INFERIOR DE SECADOR

01

TRABAJO REALIZADO POR:

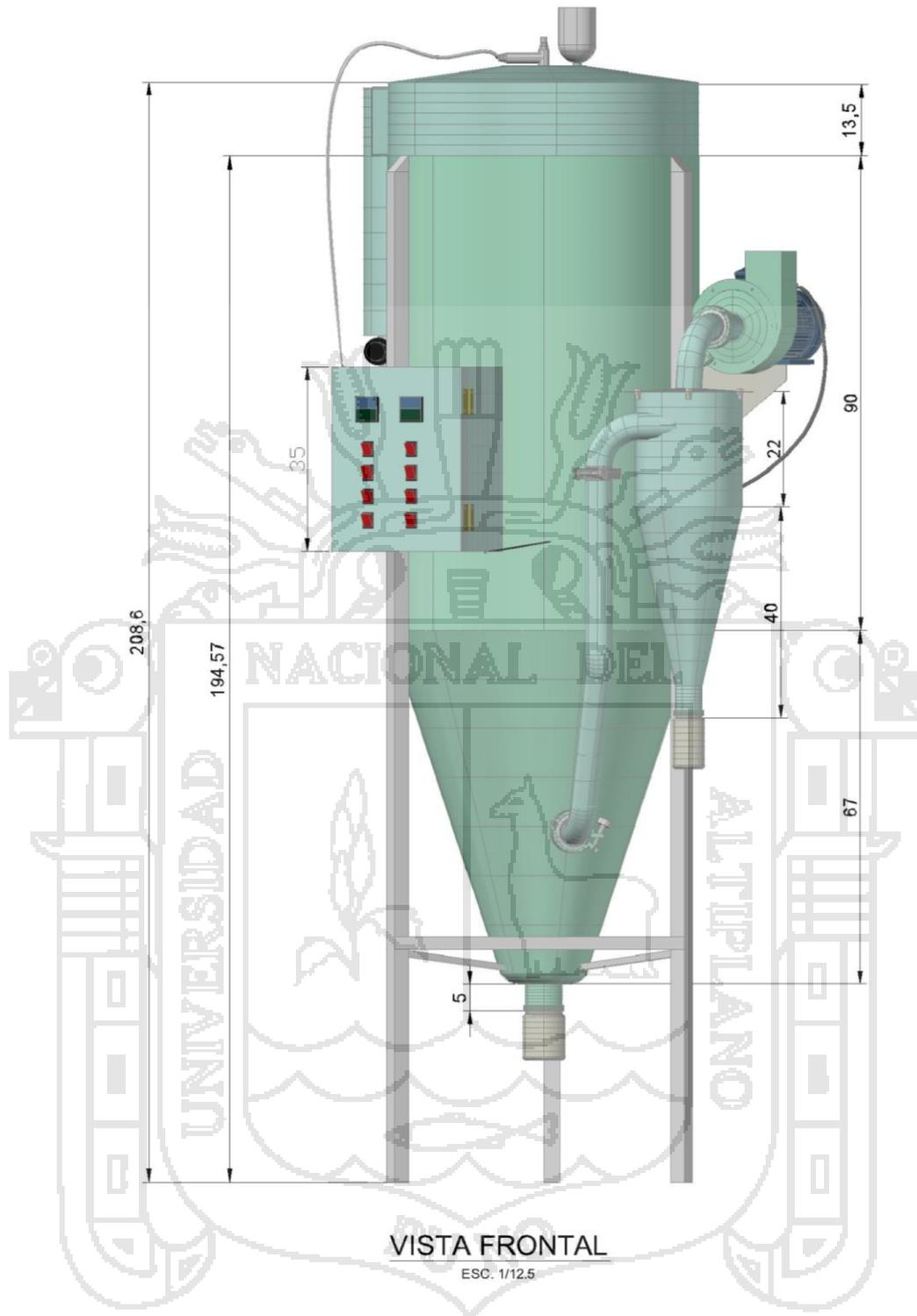
Bach. LISSET A. GALLA CHACON
Bach. JOVANA CANAZA CAMARGO

UNIDAD DE MEDIDA: CENTIMETROS

ESCALA: INDICADAS

FECHA: DICIEMBRE, 2012





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

TESIS: CONSTRUCCION DE SECADOR POR ATOMIZACION

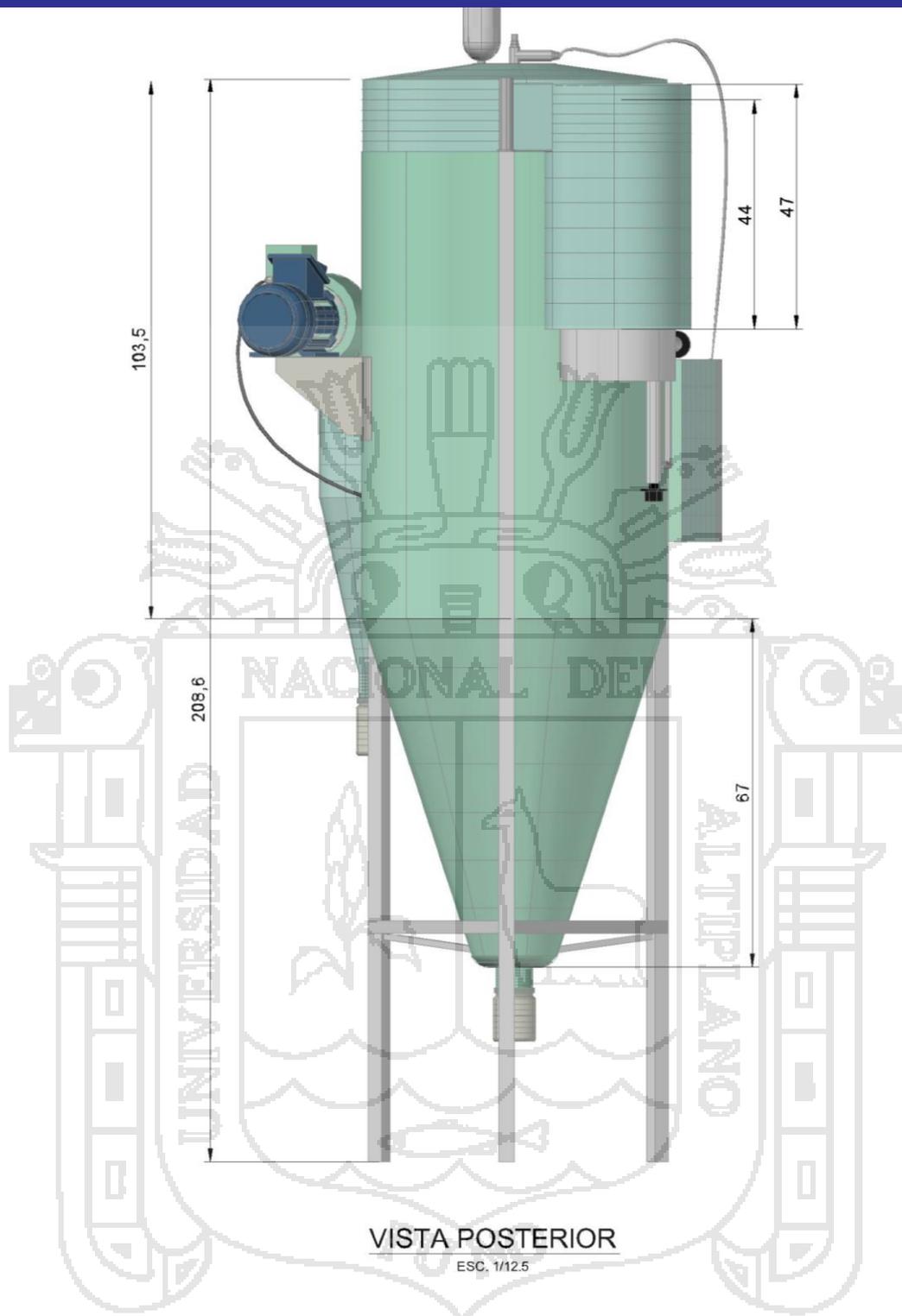
PLANO: VISTA FRONTAL DE SECADOR

LAMINA:

UBICACION:
Distrito: PUNO
Provincia: PUNO
Delimitación:

TRABAJO REALIZADO POR:
Bach. LISSET A. CALLA CHACON
Bach. JOVANA CANAZA CAMARGO

02



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

TESIS:
CONSTRUCCION DE SECADOR POR ATOMIZACION

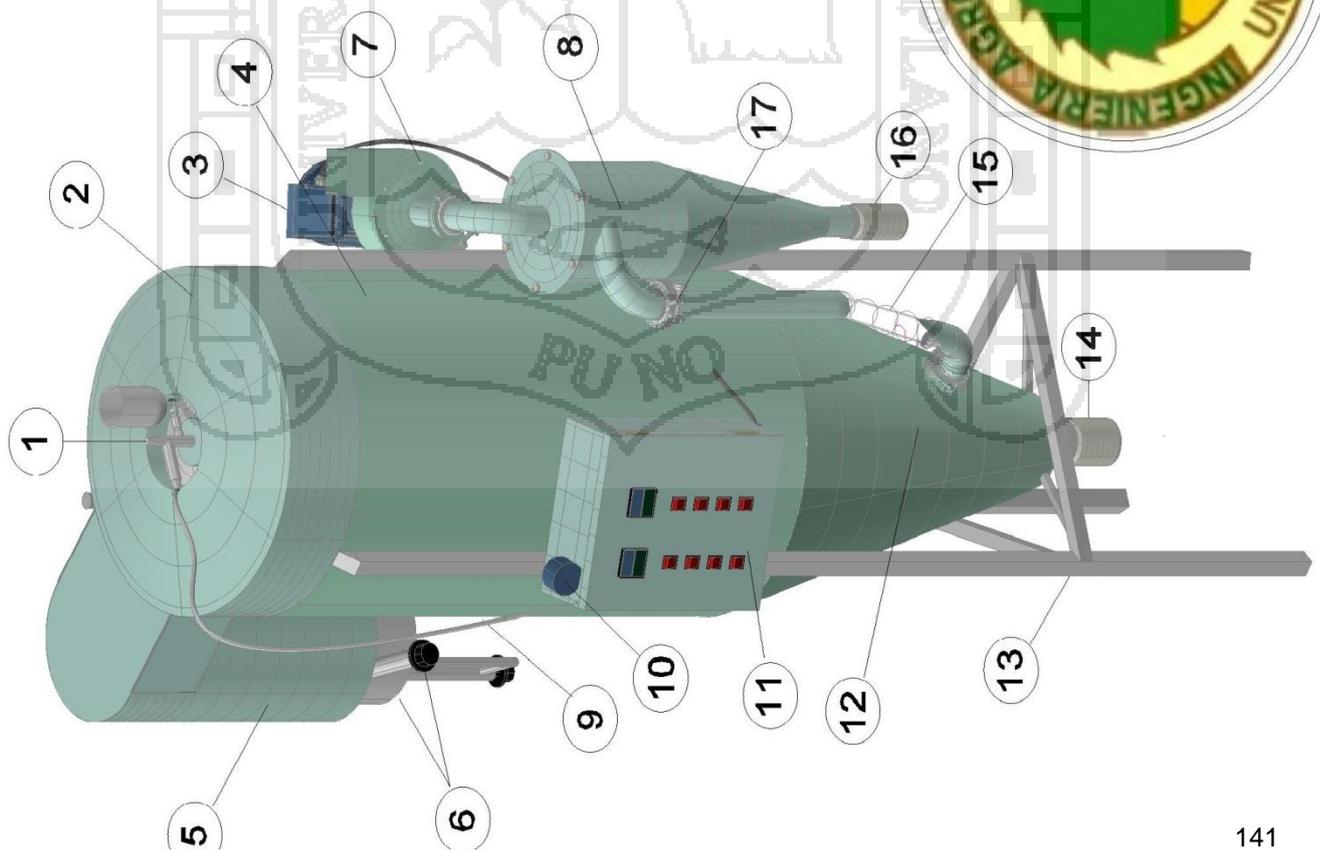
PLANO:
VISTA POSTERIOR DE SECADOR

LAMINA:

UBICACION:
Distrito:
PUNO
Provincia:
PUNO

TRABAJO REALIZADO POR:
Bach. LISSET A. CALLA CHACON
Bach. JOVANA CANAZA CAMARGO

03



LEYENDA	
1	TOBERA NEUMÁTICA
2	TAPA CILÍNDRICA
3	MOTOR ELÉCTRICO
4	CÁMARA DE SECADO
5	CALEFACTOR DE AIRE
6	HORNALLA DE GAS
7	VENTILADOR-EXTRACTOR
8	CICLÓN
9	MANGUERA DE AIRE COMPRIMIDO
10	MANÓMETRO/AIRE DE ATOMIZACIÓN
11	TABLERO DE CONTROL
12	PORTE CÓNICA/CÁMARA DE SECADO
13	EXTRUCTURA DE SOPORTE
14	RECOLECTOR PRIMARIO
15	TUBERÍA DE TRANSPORTE
16	RECOLECTOR SECUNDARIO
17	ABRASADERAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
 FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

TESIS: **CONSTRUCCIÓN DE SECADOR POR ATOMIZACIÓN**

PLANO: **DETALLES DE SECADOR VISTA EN ISOMÉTRICO** LÁMINA: **04**

TRABAJO REALIZADO POR:
 Bach. LISSET A. CALLA CHACÓN
 Bach. JOVANA CANAZA CAMARGO

UBICACIÓN:
 Distrito: PUNO
 Provincia: PUNO
 Dpto./registro: PUNO

UNIDAD DE MEDIDA: CENTÍMETROS ESCALA: 1 / 12.5 FECHA: DICIEMBRE, 2012

