



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO DE DOS ETAPAS MIXTO PARA QUINUA CON CAPACIDAD DE 40 QUINTALES HORA”

SÁNCHEZ SORNOZA EDWIN GEOVANNY

TRABAJO DE TITULACIÓN **TIPO: PROPUESTAS TECNOLÓGICAS**

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2017

ESPOCH

Facultad de Mecánica

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2016-05-30

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

SÁNCHEZ SORNOZA EDWIN GEOVANNY

Titulado:

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO DE DOS
ETAPAS MIXTO PARA QUINUA CON CAPACIDAD DE 40 QUINTALES
HORA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez
DIRECTOR

Ing. Nelson Santiago Chuquin Vasco
ASESOR

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: SÁNCHEZ SORNOZA EDWIN GEOVANNY

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO DE DOS ETAPAS MIXTO PARA QUINUA CON CAPACIDAD DE 40 QUINTALES HORA”

Fecha de Examinación: 2017-06-23

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez DIRECTOR			
Ing. Nelson Santiago Chuquin Vasco ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Geovanny Novillo Andrade
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

DERECHOS DE AUTORÍA

El Trabajo de Titulación que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Sánchez Sornoza Edwin Geovanny

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Sánchez Sornoza Edwin Geovanny, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Sánchez Sornoza Edwin Geovanny
Cédula de Identidad: 172490773-6

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico con todo mi corazón a mi Madre Digna María Sornoza Mendoza, a mi Padre Monge Ceveriano Sánchez Diaz, mis Hermanos Omar y Kevin que nunca perdieron la fe en mí, y me alimentaron de su apoyo incondicional.

Edwin Geovanny Sánchez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme los recursos necesarios para cumplir esta meta, mi familia por el apoyo incondicional mostrado hacia mí.

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

También a los compañeros que estuvimos desde el inicio en esta carrera, que nos brindamos apoyo uno al otro hasta alcanzar esta meta propuesta.

Edwin Geovanny Sánchez

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 <i>Objetivo general.</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos.</i>	2
2. MARCO REFERENCIAL	
2.1 Marco conceptual.....	4
2.1.1 <i>Diseño mecánico.</i>	4
2.1.2 <i>Relación de carga de sólidos.</i>	4
2.1.2.1 <i>Transporte en fase diluida</i>	4
2.1.2.2 <i>Transporte en fase densa</i>	5
2.1.2.3 <i>Límites entre fase diluida y fase densa</i>	5
2.1.2.4 <i>Fluidización.</i>	6
2.1.2.5 <i>Velocidad superficial del aire.</i>	7
2.1.2.6 <i>Saltación.</i>	7
2.1.2.7 <i>Choking.</i>	7
2.1.2.8 <i>Longitud de aceleración.</i>	8
2.1.2.9 <i>Permeabilidad.</i>	8
2.2 Marco teórico	8
2.2.1 <i>Origen de la quinua.</i>	8
2.2.1.1 <i>Valor nutricional del grano de quinua.</i>	8
2.2.1.2 <i>Características morfológicas del grano de quinua.</i>	9
2.2.2 <i>Transportadores de granos.</i>	11
2.2.3 <i>Clasificación de los transportadores neumáticos.</i>	11
2.2.3.1 <i>Transporte por succión en fase diluida.</i>	11
2.2.3.2 <i>Transporte neumático en fase diluida por presión positiva.</i>	12
2.2.3.3 <i>Transporte combinado.</i>	13
2.2.4 <i>Partes de un sistema de transporte neumático en fase diluida.</i>	13
2.2.4.1 <i>Fuentes de aire.</i>	13
2.2.5 <i>Tipos de elementos soplantes.</i>	14
2.2.5.1 <i>Ventilador.</i>	14
2.2.5.2 <i>Soplador.</i>	15
2.2.5.3 <i>Compresor.</i>	15
2.2.5.4 <i>Separador de aire y material.</i>	16
2.2.6 <i>Dimensionamiento de ciclones.</i>	16
2.2.7 <i>Tipos de separadores ciclónicos.</i>	17
2.2.7.1 <i>Ciclones de alta eficiencia.</i>	17
2.2.7.2 <i>Ciclones de alta capacidad.</i>	18
2.2.7.3 <i>Ciclones convencionales.</i>	18
2.2.8 <i>Válvula dosificadora.</i>	19
2.2.9 <i>Materiales usados en la fabricación de transportadores de granos.</i>	20
2.2.10 <i>Aceros inoxidable.</i>	20

2.2.11	<i>Clasificación de los aceros inoxidable</i>	21
2.2.11.1	<i>Aceros inoxidable martensíticos</i>	21
2.2.11.2	<i>Aceros inoxidable ferríticos</i>	21
2.2.11.3	<i>Aceros inoxidable austeníticos</i>	21
2.2.11.4	<i>Aceros inoxidable AISI 304</i>	21
2.2.11.5	<i>Aceros inoxidable austenoferríticos (Dúplex)</i>	22
2.2.11.6	<i>Aceros galvanizados</i>	22
2.3	Marco metodológico	23
2.3.1	<i>Identificación de la necesidad</i>	23
2.3.2	<i>Investigación preliminar</i>	23
2.3.3	<i>Diseño conceptual</i>	23
2.3.4	<i>Diseño preliminar</i>	24
2.3.5	<i>Diseño detalle</i>	25
2.3.6	<i>Documentación</i>	25
2.3.7	<i>Solución</i>	25
2.4	Softwares para el diseño del transportador	
2.4.1	<i>ANSYS</i>	25
2.4.2	<i>SOLIDWORKS</i>	25
3.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	
3.1	Determinación de las especificaciones y requerimientos	26
3.1.1	<i>Requerimientos del usuario</i>	26
3.1.2	<i>Requerimientos técnicos</i>	27
3.1.3	<i>Resultados de la matriz QFD</i>	27
3.1.4	<i>Conclusiones de la matriz QFD</i>	27
3.2	Análisis funcional	29
3.3	Soluciones para el módulo	30
3.3.1	<i>Soluciones para el módulo 1</i>	30
3.3.1.1	<i>Secado de quinua</i>	30
3.3.1.2	<i>Apilado de la quinua en la mesa de secado</i>	31
3.3.1.3	<i>Posicionamiento de la tubería de succión en el producto</i>	31
3.3.1.4	<i>Transporte de la quinua por la etapa de succión</i>	31
3.3.1.5	<i>Descarga de la quinua en la etapa de presión</i>	33
3.3.1.6	<i>Transporte de la quinua por la etapa de presión</i>	35
3.3.1.7	<i>Almacenamiento de la quinua</i>	36
3.4	Matriz morfológica	38
3.4.1	<i>Solución 1</i>	39
3.4.2	<i>Solución 2</i>	40
3.4.3	<i>Solución 3</i>	40
3.5	Evaluación de soluciones.....	41
3.5.1	<i>Evaluación de criterios</i>	41
3.5.2	<i>Evaluación de cada solución con respecto a los criterios</i>	42
3.5.3	<i>Conclusiones</i>	44
3.5.4	<i>Características y elementos de conformación del sistema de transporte</i>	45
4.	DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO DE DOS ETAPAS MIXTO PARA QUINUA CON CAPACIDAD DE 40 QQ/H	
4.1	Requerimientos para el diseño	48
4.2	Diseño del ciclón	48
4.2.1	<i>Diseño geométrico del ciclón tipo zenz</i>	49
4.2.1.1	<i>Cálculo del caudal de aire de entrada al ciclón</i>	49

4.2.1.2	<i>Cálculo del diámetro del ciclón.....</i>	50
4.2.1.3	<i>Dimensiones del ciclón.</i>	51
4.2.1.4	<i>Cálculo de la resuspensión.....</i>	52
4.2.1.5	<i>Velocidad de saltación.....</i>	52
4.3	Determinación del diámetro de tubería de succión y presión.....	54
4.3.1	<i>Determinación del diámetro de tubería en la etapa de succión.....</i>	54
4.3.1.1	<i>Flujo másico del material en la etapa de succión.....</i>	54
4.3.1.2	<i>Área de tubería de succión.....</i>	54
4.3.1.3	<i>Caudal de aire en succión.....</i>	55
4.3.1.4	<i>Flujo másico gas en succión.....</i>	56
4.3.1.5	<i>Relación másica.....</i>	56
4.3.2	<i>Selección de la tubería de succión.....</i>	56
4.3.3	<i>Determinación del diámetro de tubería en la etapa de presión.....</i>	57
4.3.3.2	<i>Área de tubería de presión.....</i>	57
4.3.3.3	<i>Caudal de aire en presión.....</i>	57
4.3.3.4	<i>Flujo másico en la presión.....</i>	58
4.3.3.5	<i>Relación másica.....</i>	58
4.3.4	<i>Selección de tubería para la etapa de presión.....</i>	59
4.4	Cálculo de pérdidas de energía en la tubería de succión y presión.....	59
4.4.1	<i>Cálculo de pérdidas de energía en la tubería de succión.....</i>	59
4.4.1.1	<i>Perdidas de energía en etapa de succión tramo horizontal.....</i>	60
4.4.1.2	<i>Perdidas de energía en succión tramo vertical.....</i>	64
4.4.2	<i>Cálculo de pérdidas de energía en la tubería de presión.....</i>	67
4.4.2.1	<i>Perdidas de energía en etapa de presión tramo horizontal.....</i>	67
4.4.2.2	<i>Perdidas de energía en la etapa de presión tramo vertical.....</i>	71
4.5	Cálculo de pérdidas de energía en los accesorios del sistema neumático.....	74
4.6	Cálculo de pérdidas de energía totales del sistema neumático.....	74
4.7	Cálculo de la potencia requerida para el sistema de transporte.....	75
4.7.1	<i>Caudal de aire.....</i>	75
4.7.2	<i>Potencia perdida en el sistema.....</i>	75
4.7.3	<i>Presión requerida para transporte de gas y quinua.....</i>	75
4.7.4	<i>Potencia requerida para mover quinua y gas.....</i>	76
4.7.5	<i>Potencia requerida del sistema.....</i>	77
4.8	Selección del ventilador.....	77
5.	SIMULACIÓN DEL PROCESO DE TRANSPORTE DE QUINUA UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS	
5.1	Creación del módulo Fluid flow (Fluent) en ANSYS Workbench.....	78
5.2	Geometría del equipo.....	79
5.3	Malla computacional para la geometría.....	80
5.4	Configuración para la simulación.....	82
5.5	Ejecución de la simulación.....	84
5.6	Resultados de la simulación.....	85
5.6.1	<i>Resultados en la etapa succión.....</i>	85
5.6.2	<i>Resultados en la etapa de presión.....</i>	87
5.7	Visualización en realidad aumentada.....	89
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 90	
6.1	Conclusiones.....	90
6.2	Recomendaciones.....	91

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1	Contenido nutricional quinua 9
2	Medidas ortogonales, diámetro equivalente y rendimiento en el tamizado 10
3	Densidad, humedad y masa de los frutos 10
4	Propiedades de la quinua 10
5	Eficiencia de remoción en familia de ciclones 17
6	Dimensionamiento de un ciclón de alta eficiencia 17
7	Dimensionamiento de ciclones de alta capacidad 18
8	Dimensionamiento de ciclones convencionales 19
9	Serie correspondiente al acero Inoxidable 20
10	Propiedades del acero inoxidable 304 22
11	Evaluación de criterios 42
12	Evaluación de soluciones respecto al caudal de aire 42
13	Evaluación de soluciones respecto a la velocidad de transporte 43
14	Evaluación de soluciones respecto a la producción..... 43
15	Evaluación de soluciones respecto a la ergonomía..... 43
16	Evaluación de soluciones respecto al material 44
17	Evaluación de soluciones respecto al costo 44
18	Conclusiones..... 45

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1	Transporte en fase diluida..... 5
2	Transporte en fase densa..... 5
3	Fases de fluidización 7
4	Geometría del grano de la quinua 9
5	Tipos de transporte neumático..... 11
6	Sistema de transporte por succión 12
7	Sistema de transporte por presión positiva 12
8	Transporte combinado de succión más presión positiva 13
9	Curva característica de un ventilador 15
10	Curva Característica de un soplador 15
11	Separador ciclónico 16
12	Variables de un ciclón 16
13	Válvula dosificadora 19
14	Diseño auxiliar de válvula rotativa 20
15	Casa de la calidad 24
16	Casa de la calidad del sistema de transporte neumático 28
17	Función principal del sistema de transporte neumático..... 29
18	Función secundaria (Modulo 1)..... 30
19	Motor eléctrico y ventilador 31
20	Motor de combustión y ventilador..... 32
21	Motor eléctrico y soplador..... 32
22	Ciclón, válvula dosificadora y tolva 33
23	Ciclón, válvula dosificadora y tubería de descarga 34
24	Ciclón, válvula dosificadora y Venturi 34
25	Motor eléctrico y ventilador 35
26	Motor de combustión interna y ventilador 35
27	Motor eléctrico y soplador..... 36
28	Almacenamiento en silo 37
29	Almacenamiento manual en lonas 37
30	Almacenamiento en un contenedor rectangular 38
31	Matriz morfológica para el sistema de Transporte Neumático..... 39
32	Solución 1 39
33	Solución 2 40
34	Solución 3 40
35	Componentes externos del sistema de transporte 46
36	Componentes externos del sistema de transporte 46
37	Componentes externos del sistema de transporte 46
38	Componentes internos del sistema de transporte..... 47

39	Dimensiones generales para ciclones	49
40	Diseño geométrico del ciclón	52
41	Análisis de tramo de tubería	59
42	Módulo Fluid flow (fluent).....	79
43	Geometría del equipo en SolidWorks.....	79
44	Geometría del equipo en ANSYS (Fase 1).....	80
45	Geometría del equipo en ANSYS (Fase 2)	80
46	Malla de la geometría (Fase1)	81
47	Malla de la geometría (Fase1)	81
48	Datos de la malla (Fase 1)	82
49	Datos de la malla (Fase 2)	82
50	Datos de material (quinua)	83
51	Exportación del historial de partículas	83
52	Importación del historial de partículas	84
53	Ejecución de la simulación	84
54	Desplazamiento quinua.....	85
55	Velocidad del producto.....	86
56	7. Remolino en la succión.....	87
57	8. Velocidad del producto.....	87
58	Remolino en la fase 2	88
59	Tiempo de flujo	88
60	Flujo de llenado etapa succión.....	89
61	Flujo de almacenamiento fase 2	89

LISTA DE ABREVIACIONES

AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero
ASTM	Asociación Americana de ensayo de materiales
DFQ	Diseño para la Función de Calidad
DFE	Diseño para la Función del Entorno
AISC	Instituto Americano para la Construcción en Acero
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
CAD	Diseño Asistido por Computador
VOC	Voz del Cliente
UI	Unidad independiente

LISTA DE ANEXOS

- A** Propiedades físicas de la quinua
- B** Propiedades físicas del aire
- C** Selección de tubería de succión y descarga
- D** Selección del ventilador
- E** Dimensionamiento de ciclones convencionales

RESUMEN

La falta de automatización en procesos pos cosecha y la problemática de baja productividad de las plantas agroindustriales de quinua en la provincia de Chimborazo, por no tener tecnologías para transportar granos motivaron en realizar un estudio de diseño de un sistema de transporte que cumpla con características específicas de recolección del grano desde la secadora hasta un silo de almacenamiento. El desarrollo del proyecto tiene como alcance diseñar un sistema de transporte neumático mixto de dos etapas para quinua con capacidad de 40 quintales por hora de trabajo; Esto implicó la recopilación de información necesaria para realizar un estudio de alternativas tecnológicas existentes en el mercado y seleccionar la opción más viable que cumplan con los requerimientos del usuario, parámetros de calidad y producción. Posteriormente se realizó el diseño mecánico de los elementos que conforman el sistema de transporte, realizando cálculos que otorgan parámetros en el dimensionamiento de tuberías de succión, presión, selección de la fuente de aire, y del equipo separador de fases llamado ciclón; Para la validación de resultados que se obtuvo en el cálculo se optó por realizar una simulación del sistema, usando el software Ansys, que a través del módulo “fluent” se pudo observar el fenómeno de transporte en fase diluida del grano en la etapa de succión, separación de fases e impulsión. En conclusión el sistema de transporte neumático mixto de dos etapas, es adecuado para el transporte del grano de quinua ya que permite la absorción desde lugares apilados y la impulsión del mismo hacia un lugar de almacenamiento, obteniendo ahorro de mano de obra, optimización de tiempo de producción, aislamiento del producto de la mano humana garantizando la inocuidad del producto, y repercutiendo de manera positiva en la salud del operario. La implementación de accesorios como boquillas y ciclones de descarga en la recolección y deposición del grano facilitarían la operación de la maquinaria y protegería al grano de choques bruscos en el almacenamiento.

PALABRAS CLAVES: <TRANSPORTE NEUMÁTICO>, <FLUIDIZACIÓN>, <FASE DENSA>, <FASE DILUIDA>, <SALTACION>, <VELOCIDAD BLOQUEO>, <CARGA DE SOLIDOS>

ABSTRACT

The lack of automation in post-harvest processes and the problem of low productivity of the agro industrial plants of quinoa in Chimborazo province for not having technologies to transport grains, motivated to carry out a design study of a transport system that fulfills with specific characteristics of grain picking from the dryer to a storage silo. The development of the project is aimed at designing a mixed two-stage pneumatic conveyor system for quinoa with a capacity of 40 quintals per hour of work: This involved the collection of necessary information to carry out a study of existing technological alternatives in the market and to select the more viable option that meet the requirements of the user, quality and production parameters. Subsequently, it was done a mechanical design of the elements that make up the transport system, making calculations that give parameters in the dimensioning of suction pipes, pressure, selection of air source, and the cyclone phase separation equipment. To validate the results gotten in the calculation, it was chosen the simulation system. Using Ansys software, through the module “fluent” could observe the phenomenon of diluted phase conveying of the grain in the stage of suction, separation and swing phase. In conclusion, the two-stage mixed pneumatic conveying system is suitable for the conveyance of quinoa because it allows the absorption from stacked places and the swing of the same to a place of storage and in this way getting labor savings, time production optimization, isolation of the product from human and guaranteeing the harmlessness of the product and positively impact on operator’s health. The implementation of accessories such as nozzles and discharge cyclones in the collection and deposition of the grain would facilitate the operation of the machinery and protect the grain from sudden shocks in the storage.

KEY WORDS : <PNEUMATIC CONVEYOR>,<DENSE PHASE CONVEYING>
,<DILUTED PHASE CONVEYING >,<FLUIDIZING PHASES >,<ANSYS
FLUENT>,<SPEED LOCK>,<SOLIDS LOAD>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

En la industria el transporte de material sólido a través de una corriente de gas se hace cada vez más importante ya que con este sistema se evitan pérdidas de tiempo en la producción y desperdicios del material a transportar, además su diseño involucra conceptos como la mecánica de fluidos, dinámica, diseño de máquinas y otras áreas de la Ingeniería, lo cual hace un sistema de transporte eficaz en comparación a un proceso de transporte manual, por tal razón este sistema conlleva a tener una mayor ganancia para la industria.

Debido a que el transporte de material sólido y gas es bastante complejo de analizar se hace uso de ecuaciones empíricas y a menudo en el diseño de estos sistemas se utilizan estas ecuaciones para entender de mejor manera el fenómeno.

En la actualidad estos sistemas de transporte neumático son diseñados con el objetivo de lograr que el producto llegue a su lugar de almacenamiento libre de impurezas, obteniendo así un producto de mejor calidad.

Los sistemas de transporte que comúnmente se utilizan para este proceso pueden ser con fuente de gas para la succión y otra para la etapa de presión, pero se los puede diseñar con una sola fuente tanto para la succión y la presión, lo que se llama un sistema de transporte neumático combinado. Hay que tener en cuenta que todos estos sistemas poseen tuberías y otros elementos por donde circula el material que se está transportando, lo que hace indispensable que no exista demasiada humedad en el producto debido a que se puede obstruir los elementos o quedar con mucha adición de polvo u otras sustancias ajenas al producto.

1.1 Antecedentes

La quinua es un pseudocereal originario de los Andes en América del sur, considerándose un recurso consumible natural de alto valor nutritivo, cuya importancia es cada vez más reconocida en la seguridad alimentaria, para las generaciones presentes y futuras. Por

cada 100 gramos contiene 399 Kcal, 16.5 % de proteína, 6 % de grasa y un 69% de carbohidratos, con lo que ofrece muy buenos recursos nutricionales para ser incluida dentro de la dieta diaria alimenticia de las personas (FAO, 2013).

La Quinoa necesita de un tratamiento pos cosecha para el consumo humano, mediante procesos de clasificado, desaponificación, lavado, secado y empacado (FAOSTAT, 2013).

Una de las operaciones básicas para completar el tratamiento de la quinoa es el transporte del grano entre cada proceso. A nivel mundial los transportadores de granos que son usados son; cangilones, bandas, tornillo, por succión y descarga denominados neumáticos. Para transportar granos muy pequeños que contienen bastante cantidad de polvo se suelen usar el neumático, ya que las bandas tornillos y cangilones contaminan el medio de trabajo con polvo propio del producto (MAKLER, 2006)

De estos transportadores para el grano de quinoa se considera que es conveniente usar el neumático porque permite la succión del grano de lugares apilados de uno o varios puntos, para transportarlo a uno o diferentes lugares de almacenamiento, además de brindarle una pre limpieza a la materia prima (VEGA, 2009).

En Ecuador la FAO (Food and Agriculture Organization) conjuntamente con el Ministerio de Agricultura y Ganadería y el MAGAP (actualmente), desde el 2005 viene impulsando proyectos de fomento de la producción de quinoa en las provincias de Carchi, Cotopaxi, Bolívar, Pichincha, Imbabura y Chimborazo (PERALTA, 2009).

La empresa “Agroequipos del Ecuador”, tiene como misión la construcción de maquinaria involucrada en el proceso de alimentos, entre ella la fabricación de equipos dedicados al tratamiento pos cosecha de la quinoa, como escarificadoras, lavadoras, secadoras, clasificadoras entre otras. Estos equipos se encuentran operativos en las plantas procesadoras de quinoa de Cajabamba y Calpi dentro de la provincia de Chimborazo. La dirección de la empresa, por observación de los procesos en las plantas operativas procesadoras de quinoa, se ha percatado, que existe un punto en el proceso donde se transporta el grano manualmente con palas desde la secadora hasta el elevador del silo de almacenamiento de producto terminado.

Esto se da por la no existencia de un sistema de transporte de grano que sirva de enlace entre la secadora y el elevador.

1.2 Justificación

En la actualidad las plantas agroindustriales de quinua en la provincia de Chimborazo, transportar el grano desde la secadora hasta un silo de almacenamiento se lo realiza de manera manual, utilizando palas, baldes, múltiples operadores, daño físico del grano de quinua, enfermedades respiratorias, disminuyendo la capacidad de producción de dichas plantas.

Al terminar el proyecto la empresa contara con un sistema que permita transportar el grano de quinua entre la secadora y el silo de almacenamiento evitando el contacto humano con el producto y aumentando la producción de la planta.

La Empresa contara con el diseño y toda la documentación del proyecto que le permitirá fabricar un sistema de transporte alternativo al que poseen actualmente, que garantice disminuir las pérdidas, aumentar la productividad, disminuir el polvo, mejorar el ambiente de trabajo y brindar mayor calidad al producto terminado.

Una vez terminado el trabajo servirá de una guía metodológica para futuros investigadores sobre el transporte de granos neumáticamente.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Diseñar un sistema de transporte neumático de dos etapas mixto para quinua con capacidad de 40 quintales hora.

1.3.2 *Objetivos específicos.*

- Realizar el estudio bibliográfico de los distintos métodos para transporte neumático y analizar el proceso más adecuado y eficiente para su diseño.
- Realizar un diseño conceptual del sistema de transporte neumático mixto de dos etapas.

- Realizar un diseño de detalle del sistema de transporte neumático mixto de dos etapas.
- Realizar una simulación mediante el software ANSYS.

CAPÍTULO II

2. MARCO REFERENCIAL

El siguiente contexto se refiere a las bases teóricas para realizar el diseño de un sistema de transporte neumático de quinua con capacidad de 1814 kg por hora, el cual tiene por objetivo desarrollar los conceptos, herramientas y metodologías fundamentales asociadas al tema de investigación para su posterior desarrollo. Los aspectos que se van a tratar en este acápite son: la quinua, tipos y sus características, procesos y tecnologías de transporte, los tipos de máquinas empleadas para el proceso de transporte neumático, metodologías de diseño, software a emplearse, y los materiales utilizados para la construcción de máquinas transportadoras neumáticas de granos.

2.1 Marco conceptual

2.1.1 *Diseño mecánico.* Diseño es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema mediante el uso de herramientas de Ingeniería (como las matemáticas, la estadística, computación, las gráficas y el lenguaje) los cuales se combinan para producir un plan, el que llevando a cabo se crea un producto funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que se puede fabricar y comercializar (SHIGLEY, 2011).

2.1.2 *Relación de carga de sólidos.* Es la relación entre el flujo másico del material transportado y el flujo másico del aire usado para transportar, o mejor dicho es una cantidad adimensional útil ya que su valor no varía con la presión de aire de transporte y por lo tanto su valor se mantiene constante a lo largo de la tubería.

2.1.2.1 *Transporte en fase diluida.* Se produce cuando un material es transportado en suspensión dentro de la tubería, para aquello se debe cumplir con una velocidad mínima de aire que permita tener el material suspendido; en la mayoría de materiales corresponde de 13 a 15 m/s la velocidad del aire. Es el más conocido y se caracteriza por altas velocidades de gas, bajas concentraciones de sólidos (menores a 1% en volumen) y bajas pérdidas de carga por unidad de longitud de cañería (típicamente, menores a 5 mbar/m).

El transporte neumático en fase diluida está limitado a cortas distancias, transporte de sólidos continuo a caudales menores a 10 ton/h y el único sistema capaz de operar bajo presiones negativas.

Bajo estas condiciones, las partículas sólidas se comportan como si se encontraran completamente suspendidas en el gas en forma individual (es decir que se comportan como si se encontraran solas en el gas), y las fuerzas fluido-partícula predominan (VEGA, 2009).

Figura 1. Transporte en fase diluida



Fuente: (VEGA, 2009)

2.1.2.2 *Transporte en fase densa.* El transporte en fase densa se da a velocidades bajas y el material no es suspendido dentro de la tubería, sino que se transporta en forma de cartuchos, velocidades q son mucho menores que los requeridos para el transporte en fase diluida. Caracterizado por bajas velocidades de gas (1-5 m/s), altas concentraciones de sólidos (mayores a 30% en volumen) y grandes pérdidas de carga por unidad de longitud de cañería (usualmente mayores a 20 mbar/m).

En el transporte en fase densa, las partículas no se encuentran completamente suspendidas y la interacción entre ellas es mucho mayor.

Figura 2. Transporte en fase densa



Fuente: (VEGA, 2009)

2.1.2.3 *Límites entre fase diluida y fase densa.* No existe una manera de consensuar cuando se trata de fase diluida o fase densa, de manera común se utiliza la observación y descripción de las mismas, para ubicar que tipo de transporte se está utilizando.

Para diferenciar los dos tipos de transporte se recurre a un parámetro de referencia de velocidad de “Choking” la cual marca un límite entre fase diluida y fase densa, valores superiores a la velocidad de Choking indican fase diluida e inferiores a estas Fase densa (MILLS, 2004).

2.1.2.4 Fluidización. Es el Proceso por el cual se hace posible el transporte Neumático, ya que, dependiendo del grado de este, se clasifican los tipos de transporte, ya sean en fase diluida o en fase densa; además, las condiciones de funcionamiento, como es el consumo de potencia y desgaste, están relacionados directamente con este proceso que utiliza un flujo de gas para suspender partículas sólidas. Usando un punto de vista Macroscópico, las partículas sólidas llegan a comportarse como un fluido, de allí nace el nombre de fluidización. Al conjunto de partículas fluidizadas se le denomina también lecho fluidizado.

Si se tiene un conjunto de partículas en reposo y atraviesa un flujo de fluido con un bajo caudal, se lo conoce como lecho fijo. Al aumentarse el caudal, la velocidad del fluido impulsor se incrementa, provocando que unas partículas vibren y alcancen movimientos en regiones determinadas; a esto se lo conoce como lecho expandido.

Si la velocidad se incrementa aún más, las partículas en su totalidad son suspendidas; superando la fuerza de fricción entre la partícula sólida con la tubería de transporte; También desaparece por completo las fuerzas de cohesión entre las partículas, a esto se le llama mínima fluidización.

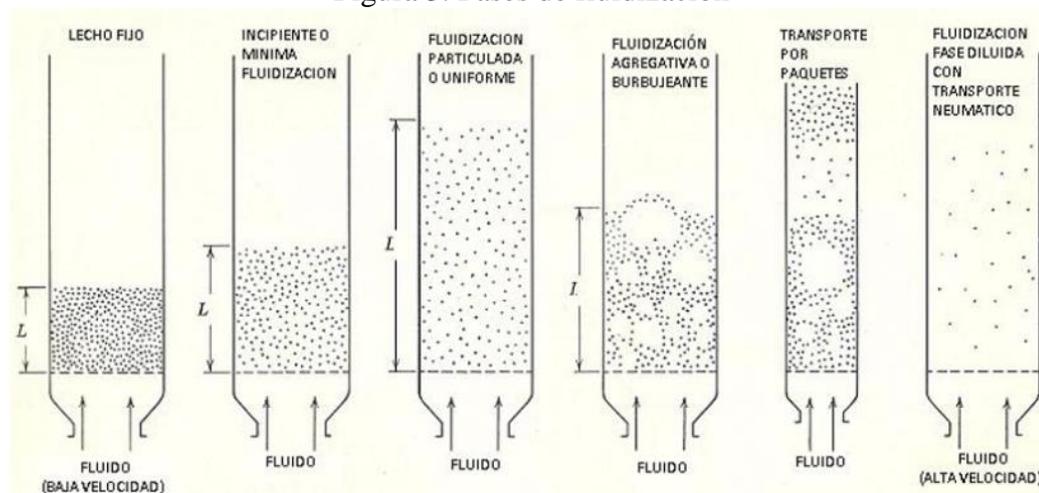
Un incremento en caudal resulta en una expansión progresiva del lecho, la mezcla es casi completa homogénea, y los burbujeos son indiferentes, tomando el nombre de fluidización particulada o uniforme.

Si se aumenta el flujo la agitación entre partículas se torna muy violenta, el lecho no se expande más allá de una mínima fluidización, produciéndose la llamada fluidización agregativa o burbujeante. Las burbujas pueden dar origen al fenómeno de empaquetamiento, según la geometría del ducto transportador o recipiente, las burbujas pueden alcanzar gran tamaño incluso a alcanzar las paredes del recipiente que lo contiene. El lecho que se encuentra sobre esta, es empujada como por un pistón, analógicamente,

hacia arriba; luego las partículas caen en un movimiento oscilante desintegrándose la burbuja, a este fenómeno se lo puede aprovechar para transportar material en fase densa.

Los tipos de mezcla (sólido-fluido) estudiados se consideran en fase densa ya que existe un lecho claramente definido. Si se aumentase la velocidad del fluido, la fuerza de arrastre a las partículas se incrementa, y las partículas se adhieren a la corriente de aire siendo transportadas por la misma, se alcanza una fluidización en fase diluida con transporte de material (VEGA, 2009).

Figura 3. Fases de fluidización



Fuente: (VEGA, 2009)

2.1.2.5 *Velocidad superficial del aire.* Es la velocidad de aire de referencia sin tener en cuenta las partículas sólidas o medios porosos.

2.1.2.6 *Saltación.* Es el proceso de deposición de partículas sólidas a lo largo de una tubería horizontal, este fenómeno se produce en fase diluida, cuando la velocidad del aire cae por debajo del valor mínimo de circulación. La velocidad de saltación es el valor de velocidad mínima al cual la fase diluida puede funcionar y es equivalente a la velocidad mínima del aire necesitado (MILLS, 2004).

2.1.2.7 *Choking.* También llamado bloqueo, y corresponde al fenómeno en tuberías verticales de transporte. Se da cuando las partículas que están cerca de la pared comienzan a invertir su movimiento, hacia abajo. A trabajo continuo la tubería se ahoga o se bloquea (MILLS, 2004).

2.1.2.8 *Longitud de aceleración.* Es la longitud necesaria para que las partículas sólidas alcancen su velocidad máxima, ya que cuando en una tubería se dosifica el grano dentro de la tubería, esta se encuentra con velocidad cero y necesita una distancia para que alcance su máxima velocidad (MILLS, 2004).

2.1.2.9 *Permeabilidad.* La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atravesase sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable (MILLS, 2004).

2.2 Marco teórico

2.2.1 *Origen de la quinua.* La planta de quinua se presume que es nativa de los alrededores del lago Titicaca en Perú y Bolivia. Antes de la conquista de los españoles la quinua ya formaba un alimento base de los ancestros sudamericanos, siendo reemplazada, con cereales a la llegada de los españoles.

Existen pruebas arqueológicas que la domesticación de este grano data de 3000 a 5000 años antes de Cristo, esto gracias a tumbas encontradas de Tarapacá, Calama y Arica en Chile. A la llegada de los españoles la quinua tenía su propia tecnología y era la base de alimentación del imperio inca.

Los españoles trataron de adaptar la planta de quinua en Europa, cayendo en decepción al ver que la planta no llegó con vida a España. Se le atribuye estas consecuencias hipotéticamente a la alta humedad a la que estaban expuestas las plantas en la travesía por el mar.

En relatos y escritos reales que los españoles realizaban, siempre mencionaban la importancia de la quinua en nuestros pueblos sudamericanos, resaltando los cultivos de Quito, La Paz, Cundinamarca y el Perú (FAOSTAT, 2013).

2.2.1.1 *Valor nutricional del grano de quinua.* Muchas personas usan la quinua en su dieta diaria, considerándolo un producto nuevo, el cual reemplaza otro tipo de granos más tradicionales. Mientras la quinua es algo nuevo para la mayoría de zonas del mundo, este grano ya formaba parte fundamental de los cultivos alimentarios de las culturas

precolombinos en América del sur. En quechua, a la quinua se le llama chisiya, que significa "grano madre".

La quinua es la única planta que siendo semilla se la puede consumir como grano. La quinua se la puede degustar de muchas maneras, cocinada para sopas, o bien harina.

Relacionado con la nutrición, la Quinua puede ser considerada y comparada con otro tipo de granos como el frejol, maíz, arroz y trigo. Si bien es cierto, la quinua resalta ante otros productos por ser una fuente de proteína de calidad, fibra dietética, grasas natural y minerales.

Aunque la quinua es una fuente indudable de energía, es recomendable consumirla dentro de una dieta con otros alimentos, a fin de conservar una alimentación equilibrada (FAOSTAT, 2013).

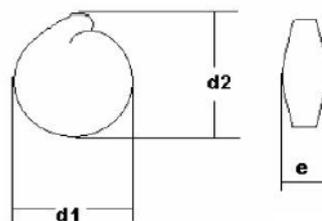
Tabla 1. Contenido nutricional quinua

Contenido de macronutrientes en la quinua, y otros granos					
Vitamina/Producto	Quinua	Frijol	Maíz	Arroz	Trigo
Energía (Kcal/100 g)	399	367	408	372	392
Proteína (g/100g)	16,5	28	10,2	7,6	14,3
Grasa (g/100g)	6,3	1,1	4,7	2,2	2,3
Total de carbohidratos	69	61,2	81,1	80,4	78,4

Fuente: (NATIONS, 2013)

2.2.1.2 Características morfológicas del grano de quinua. Las propiedades físicas del producto son muy importantes debido a que determinan parámetros necesarios para el diseño y selección de equipos. Entre estas propiedades tenemos la geometría, densidad, humedad y la característica del contenido del grano, las cuales son de gran importancia ya que si no se toman en cuenta pueden afectar al funcionamiento y cualidades de una máquina o sistema.

Figura 4. Geometría del grano de la quinua



Fuente: (CERVILLA, 2012)

Tabla 2. Medidas ortogonales, diámetro equivalente y rendimiento en el tamizado

Años de cosecha	2007	2008	2009	2010	2011
D1 (mm)	2,06±0,08	2,04±0,11	2,44±0,11	2,09±0,11	2,15±0,10
D2 (mm)	2,06±0,01	2,08±0,15	2,37±0,15	2,14±0,12	2,14±0,10
E (mm)	1,12±0,3	0,96±0,11	1,35±0,12	1,05±0,08	1,11±0,12
De (mm)	1,68	1,6	1,98	1,67	1,72

Fuente: (CERVILLA, 2012)

La densidad del grano de quinua se lo utiliza para los cálculos del sistema en si, también se ve influenciado en el cálculo de la permeabilidad del grano. Para aquello en la siguiente tabla se reflejan los datos de este parámetro, establecidos gracias a la investigación y muestreo en diferentes años de producción del grano de quinua.

Tabla 3. Densidad, humedad y masa de los frutos

	2007	2008	2009	2010	2011
Densidad Real (g/ml)	1,19±0,09	1,24±0,11	1,16±0,3	1,27±0,01	1,26±0,02
Densidad aparente (g/ml)	0,69±0,01	0,72±0,01	0,68±0,01	0,67±0,01	0,65±0,01
Peso 100 semillas (g)	0,32±0,11	0,3±0,02	0,46±0,01	0,34±0,0	0,35±0,02
Humedad %	10,1±0,0	11,45±0,007	7,93±0,06	10,45±0,08	8,85±0,05

Fuente: (CERVILLA, 2012)

Las propiedades del grano de quinua de geometría como densidad, corresponden a la realidad de la quinua en la provincia de Chimborazo. En resumen, las características principales necesarias del grano de quinua para el diseño son las siguientes:

Tabla 4. Propiedades de la quinua

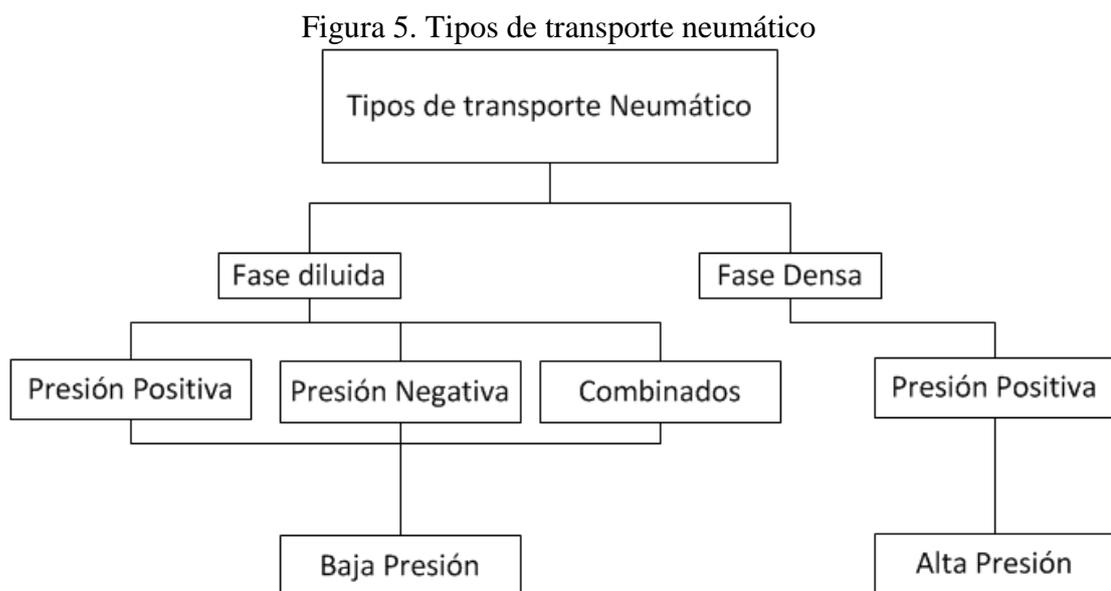
Propiedad	Valor	Unidad
Diámetro 1	2,16	mm
Diámetro 2	2,16	mm
Espesor	1,12	mm
Diámetro equivalente	1,73	mm
Densidad Real	1,22	g/ml
Densidad aparente	0,68	g/ml

Fuente: Autor

2.2.2 *Transportadores de granos.* Los sistemas y máquinas de elevación y transporte son tan diversos debido a su destinación, principios de acción y construcción, por tal razón no es posible dar una descripción detallada y los cálculos en detalle, incluso para los tipos principales.

Estos equipos de elevación y transporte suelen clasificarse, en general, por su recorrido en: horizontales, verticales, inclinados o mixtos, los cuales se encuentran los elevadores de cangilones, bandas y transporte neumático. El transporte neumático es el método escogido ya permite recoger por succión el grano apilado, además brinda una pre limpieza al producto aumentando la calidad y ahorrando tiempo de producción.

2.2.3 *Clasificación de los transportadores neumáticos.* Basándose en el estudio bibliográfico se puede concluir que existen dos tipos de transporte neumático, los cuales tienen distintos principios de funcionamiento.

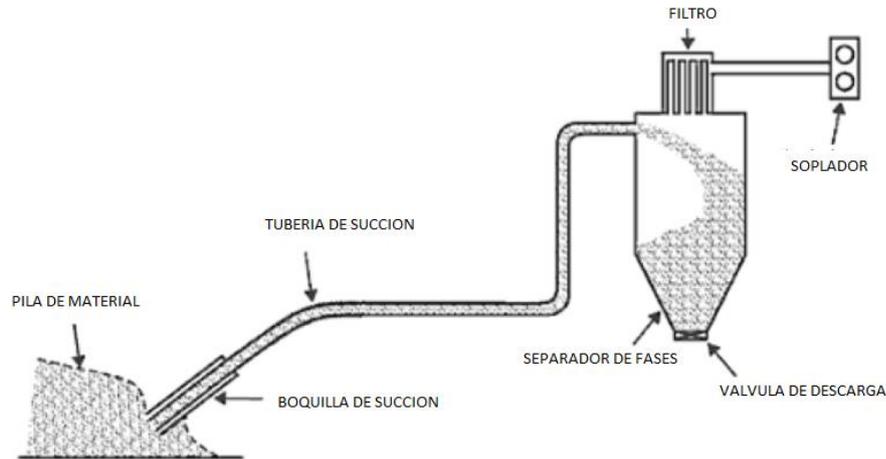


Fuente: (MILLS, 2004)

2.2.3.1 *Transporte por succión en fase diluida.* El transporte neumático por succión se utiliza mayoritariamente para arrastrar material, de uno o varios puntos a un punto en común, este sistema es muy eficiente cuando la diferencia de presión entre los puntos de carga el material es nula o mínima. Es ideal para transportar material toxico, ya que las fugas posibles son del exterior hacia dentro de la tubería, con lo que no hay riesgo de contaminación.

En este sistema es indispensable ubicar un sistema de separación aire-material antes de que la mezcla llegue al ventilador, causando daños en el mismo. También es recomendable colocar un filtro antes de pasar por la unidad principal como es el ventilador para salvaguardar la vida del mismo.

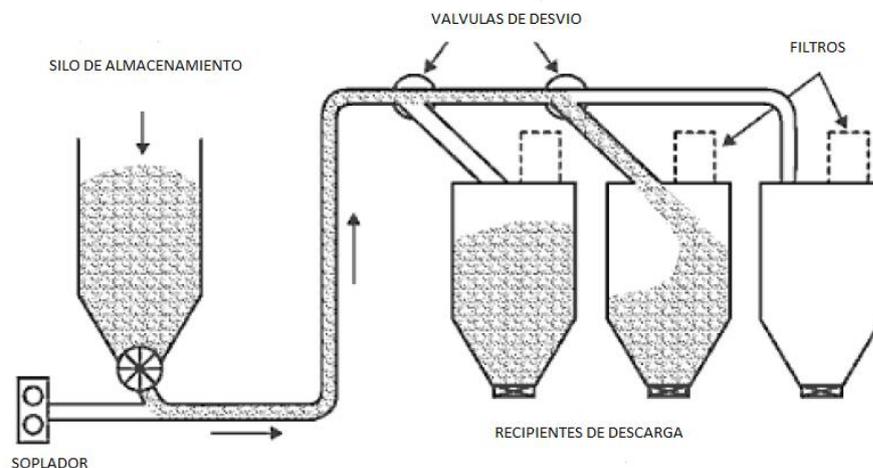
Figura 6. Sistema de transporte por succión



Fuente: (MILLS, 2004)

2.2.3.2 Transporte neumático en fase diluida por presión positiva. En este sistema se puede llevar el material a uno o varios puntos de descarga. Se aprovecha la presión positiva del ventilador para el arrastre del material además que la dosificación se la puede realizar directamente del silo de almacenamiento mediante una válvula dosificadora acoplado con un sistema de alimentación tipo Venturi, para no ser tan brusca la entrada del material a la tubería.

Figura 7. Sistema de transporte por presión positiva

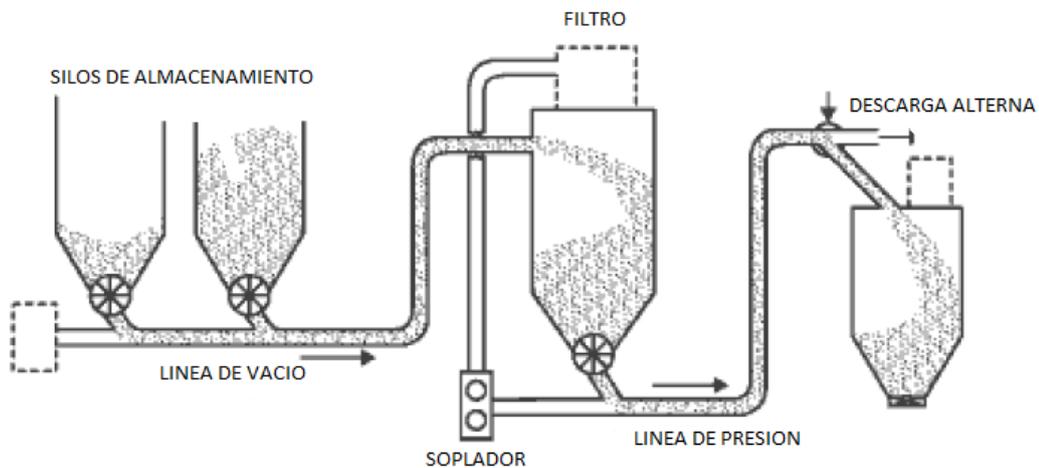


Fuente: (MILLS, 2004)

2.2.3.3 Transporte combinado. Este tipo de transporte es una mezcla de succión y presión positiva, con ello se obtiene alcanzar mayor distancia de transporte, pudiendo transportar desde varios puntos de carga hasta múltiples puntos de descarga.

Esto se lo puede realizar con solo una unidad propulsora, con la desventaja que se necesita mayor potencia ya que está incluido la succión del material y la descarga del mismo. También se lo puede hacer con dos unidades de propulsión, una para la etapa de succión y otro para la descarga, esto en caso que sea difícil realizar el mismo trabajo con solo una unidad de potencia.

Figura 8. Transporte combinado de succión más presión positiva



Fuente: (MILLS, 2004)

2.2.4 Partes de un sistema de transporte neumático en fase diluida. Los transportadores neumáticos son muy simples y sus partes móviles son muy pocas, y tienen gran acogida en lo que refiere a transporte de polvos y granos. Sus partes principales son: una fuente de gas comprimido, (generalmente aire) un elemento dosificador de material, una tubería de transporte y un elemento separador de la mezcla sólido-fluido; también puede existir un sistema de filtrado, si es necesario. De igual forma, se pueden utilizar válvulas de desvío para cambiar los recorridos del material y sus sitios de carga y descarga (MILLS, 2004).

2.2.4.1 Fuentes de aire. La fuente de aire para un transportador neumático es el corazón del sistema, es a menudo una de las decisiones más importantes a tomar. Se debe ser cuidadoso con la selección ya que éste elemento es el de mayor costo y la capacidad

potencial de transporte está relacionado con los detalles técnicos de la fuente de aire, los requerimientos de presión están fuertemente influenciados por la distancia de transporte, para largas distancias a menudo se utilizan varias unidades ubicadas a intervalos en la tubería; de esta forma se evita tener un equipo único voluminoso y poco rentable cuando se desea disminuir la cantidad de material.

Los accesorios que posee el sistema son otra fuente importante de caídas de presión. Las válvulas dosificadoras, los codos y las tuberías de diámetro reducido generan un componente importante de los requerimientos de presión que debe suplir la unidad.

Las necesidades de gas dependen fundamentalmente de la cantidad de material a transportar, el diámetro de la tubería y de la relación másica de material y fluido escogido. Un aumento en los parámetros anteriores implica mayores caudales de aire, la unidad debe ser capaz de proveer el volumen de aire requerido para el funcionamiento adecuado del sistema. Existe una gran variedad de unidades de movimiento de aire por lo que se puede satisfacer de manera adecuada prácticamente cualquier necesidad (VEGA, 2009).

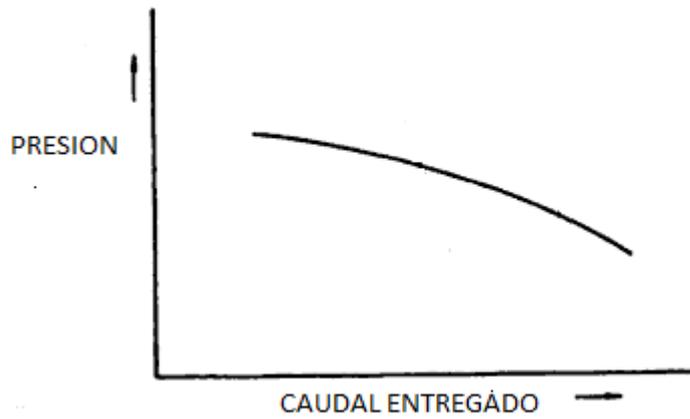
2.2.5 *Tipos de elementos soplantes.* Los elementos soplantes se dividen en Ventiladores, sopladores, y compresores.

2.2.5.1 *Ventilador.* Generan altos caudales de fluido a baja presión, generalmente son usados en sistemas de fase diluida y de poca longitud, su uso se da en sistemas con pocas posibilidades de obstrucción de la tubería. Pueden ser usados en sistemas mixtos de presión y vacío, especialmente con materiales ligeros y con poca adherencia.

El aumento en la rata de material transportado se puede dar incrementando el diámetro de la tubería, pero esto implica un mayor caudal de aire requerido.

Presenta la desventaja de una curva característica casi plana, que permite una gran variación del caudal entregado debido a los requerimientos de presión del sistema, lo anterior puede generar inconvenientes cuando se presenta acumulación de material y en consecuencia una mayor caída de presión, en éste caso es probable que el flujo de aire suministrado no sea suficiente para mantener suspendido el material y se obstruya la tubería.

Figura 9. Curva característica de un ventilador



Fuente: (VEGA, 2009)

2.2.5.2 Soplador. Son usados ampliamente en sistemas con caídas de presión inferiores a 1 bar, son probablemente los equipos más utilizados en sistemas de fase diluida, ya que permiten niveles medios de caudal y presión. Pueden ser utilizados en sistemas mixtos, y su curva característica indica que tienen poca variación en el caudal entregado independientemente de los requerimientos de presión, esto hace que las obstrucciones en la tubería ocasionadas por el material depositado debido a disminución en el caudal de aire son menos probables que con el uso de ventiladores.

Figura 10. Curva Característica de un soplador

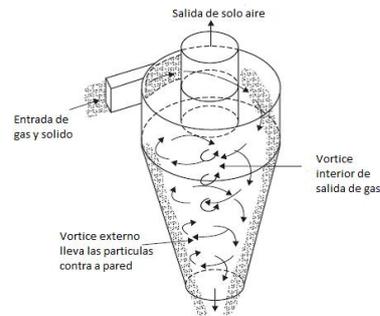


Fuente: (VEGA, 2009)

2.2.5.3 Compresor. Existe gran variedad de equipos de éste tipo, en general permiten tener niveles medios o altos de presión y un caudal elevado de aire (una sola unidad puede generar presiones de 60 PSI o superiores y caudales de 3000 Pies³/min), se utilizan en sistemas de trabajo pesado; puede presentar inconvenientes debido a que en algunos tipos el flujo es altamente pulsante y variable.

2.2.5.4 Separador de aire y material. Tanto para un sistema de presión positiva, negativa o mixto, siempre se necesita un separador de partículas, ya que el producto viaja en una mezcla de aire y material transportado, para ello el sistema más eficiente, y de fácil construcción, es el separador ciclónico.

Figura 11. Separador ciclónico



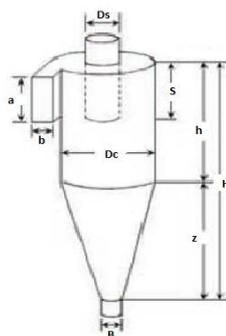
Fuente: (MILLS, 2004)

La mezcla aire – producto ingresa de manera tangencial al cilindro a velocidades que lo definen el transporte neumático, relativamente siempre mayores a 20m/s.

La fuerza centrípeta que aparece en el movimiento circular del grano en el cilindro, hace que el grano más pesado se pegue a la pared del cilindro hasta que disminuya su energía cinética y caiga en la parte cónica y por gravedad se deposite en el fondo del ciclón. Mientras que el aire es absorbido por la parte central del cilindro y evacuado hacia el exterior.

2.2.6 Dimensionamiento de ciclones. Para saber las dimensiones de un ciclón se debe saber la aplicación que se le va a dar a este equipo, por lo cual se va a caracterizar el siguiente esquema de variables en función del tipo de ciclón que se quiera seleccionar.

Figura 12. Variables de un ciclón



Fuente: (MILLS, 2004)

2.2.7 Tipos de separadores ciclónicos. Los ciclones de entrada tangencial pueden ser clasificados en 3 grandes familias o tipos que tienen características definidas; ciclones de alta eficiencia, ciclones de alta capacidad y ciclones convencionales.

La tabla 5 presenta los valores de eficiencia de separación estándar es decir partículas de un tamaño superior a 10 micrómetros, para partículas de 10 micrómetros y de 2,5 micrómetros para cada familia.

Tabla 5. Eficiencia de remoción en familia de ciclones

Familias de Ciclones	Eficiencia de Remoción (%)		
	PST	PM10	PM2.5
Convencionales	70 - 90	30 - 90	0 - 40
Alta Eficiencia	80 - 99	60 - 95	20 - 70
Alta Capacidad	80 - 99	10 - 40	0 - 10

Fuente: (VEGA, 2009)

2.2.7.1 Ciclones de alta eficiencia. Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para separar adecuadamente partículas de 5 micrómetros con una eficiencia cercana al 90%. Los diseños de éste tipo presentan caídas de presión grandes, por lo que el consumo de energía es elevado, en general éstos equipos se diseñan teniendo en cuenta la caída de presión máxima permisible.

Tabla 6. Dimensionamiento de un ciclón de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de Ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro de Ciclón	Dc/Dc	1	1	1
Altura de entrada	a/Dc	0,5	0,44	0,5
Ancho de entrada	b/Dc	0,2	0,21	0,2
Altura de salida	S/Dc	0,5	0,5	0,625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0,5	0,4	0,5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1,5	1,4	1,5
Altura parte cónica	z/Dc	2,5	2,5	2,5
Altura total del ciclón	H/Dc	4,0	3,9	4,0
Diámetro de salida de partículas	B/Dc	0,375	0,4	0,375
Factor de configuración	G	551,22	698,65	585,71
Numero de cabeza de velocidad	NH	6,4	9,24	6,4
Numero de vórtices	N	5,5	6	5,5

Fuente: (VEGA, 2009)

2.2.7.2 *Ciclones de alta capacidad.* Los ciclones de alta capacidad están diseñados para partículas de más de 20 micrómetros, aunque es posible que con partículas más pequeñas se presente algún grado de separación. En la siguiente tabla se encuentra las correlaciones que identifican la geometría y características de la familia de ciclones de alta capacidad, y para cada tipo en esta familia.

Tabla 7. Dimensionamiento de ciclones de alta capacidad

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de Ciclón	
		Stairmand	Swift
Diámetro de Ciclón	Dc/Dc	1	1
Altura de entrada	a/Dc	0,75	0,8
Ancho de entrada	b/Dc	0,375	0,35
Altura de salida	S/Dc	0,875	0,85
Diámetro de salida	Ds/Dc	0,75	0,75
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1,5	1,7
Altura parte cónica	z/Dc	2,5	2
Altura total del ciclón	H/Dc	4,0	3,7
Diámetro de salida de partículas	B/Dc	0,375	0,4
Factor de configuración	G	29,79	30,48
Numero de cabeza de velocidad	NH	8	7,96
Numero de vórtices	N	3,7	3,4

Fuente: (VEGA, 2009)

2.2.7.3 *Ciclones convencionales.* Los ciclones convencionales se encuentran en una gran cantidad de tamaños, la entrada al equipo puede ser rectangular o circular. Sirven para la separación de partículas más grandes, la caída de presión no es tan elevada y en general poseen una buena eficiencia de separación para la mayoría de las aplicaciones, de acuerdo a su disposición geométrica se pueden tener las siguientes configuraciones.

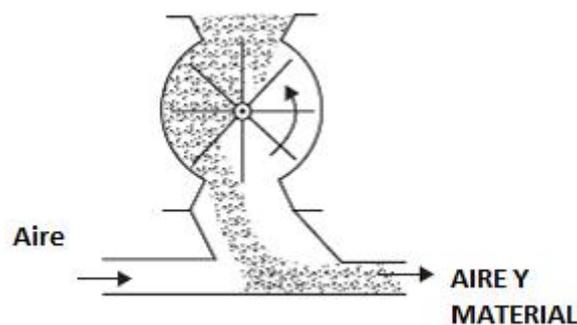
Tabla 8. Dimensionamiento de ciclones convencionales

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de Ciclón			
		Lapple	Swift	Peterson-whitby	Zenz
Diámetro de Ciclón	Dc/Dc	1	1	1	1
Altura de entrada	a/Dc	0,5	0,5	0,583	0,5
Ancho de entrada	b/Dc	0,25	0,25	0,208	0,25
Altura de salida	S/Dc	0,625	0,6	0,583	0,75
Diámetro de salida	Ds/Dc	0,5	0,5	0,5	0,5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	2	1,75	1,33	2
Altura parte cónica	z/Dc	2	2	1,837	2
Altura total del ciclón	H/Dc	4	3,75	3,17	4
Diámetro de salida de partículas	B/Dc	0,25	0,4	0,5	0,25
Factor de configuración	G	402,88	381,79	342,29	425,41
Numero de cabeza de velocidad	NH	8	8	7,78	8
Numero de vórtices	N	6	5,5	3,9	6

Fuente: (VEGA, 2009)

2.2.8 *Válvula dosificadora.* La válvula dosificadora es la encargada de extraer el producto depositado en el fondo del cono del ciclón, bien a su almacenamiento o a su descarga en caso de que sea un sistema mixto.

Figura 13. Válvula dosificadora

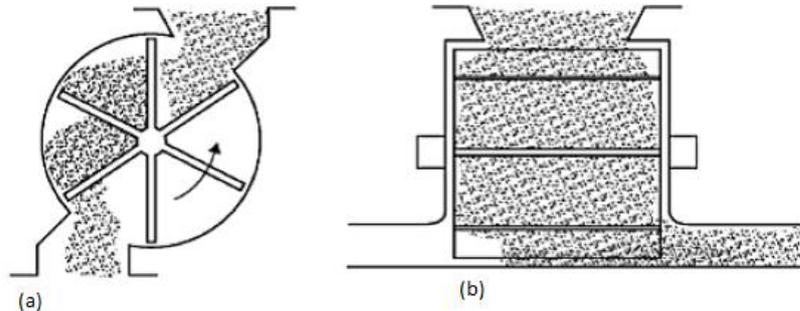


Fuente: (MILLS, 2004)

El diseño de este elemento es muy importante, debido que cumple la función de hermetizar el ciclón, y de la velocidad de su evacuación depende la capacidad del sistema de transporte. Esto influye en que sus parámetros constructivos deben poseer un porcentaje de complejidad, por lo que se requiere gran precisión. Además de escoger la

velocidad adecuada de rotación para que el grano tenga tiempo a ser evacuado. Por esta razón existen diseños auxiliares como el mostrado en la figura 14.

Figura 14. Diseño auxiliar de válvula rotativa



Fuente: (MILLS, 2004)

2.2.9 *Materiales usados en la fabricación de transportadores de granos.* Los materiales más utilizados que intervienen en la construcción de maquinaria para procesar alimentos son los aceros inoxidables y los aceros galvanizados en porcentajes menores.

2.2.10 *Aceros inoxidables.* Estos aceros son resistentes a la corrosión y al calor. Un sistema de numeración de tres números se usa para identificarlos. El primer número indica el grupo, los dos últimos no tienen significado específico.

Tabla 9. Serie correspondiente al acero Inoxidable

Designación de la serie	Grupos
2XX	Cromo-níquel-manganeso; no endurecerles, auténticos, no magnéticos.
3XX	Cromo-níquel; no endurecibles, austeníticos, no magnéticos.
4XX	Cromo-carbono; endurecibles, martensíticos, magnéticos.
4XX	Cromo; no endurecibles, ferríticos, magnéticos.
5XX	Cromo; bajo cromo, resistentes al calor.

Fuente: (AVNER, 1988)

Se los considera inoxidable gracias a la capa protectora de cromo o níquel que se forma en la superficie en una película muy delgada. El extenso rango de propiedades y características secundarias, presentes en los aceros inoxidables hacen de ellos un grupo de aceros muy versátiles. La selección de los aceros inoxidables puede realizarse de acuerdo con sus características (AVNER, 1988):

- Resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas.
- Propiedades mecánicas del acero.
- Características de los procesos de transformación a que será sometido.
- Costo total (reposición y mantenimiento)
- Disponibilidad del acero.

2.2.11 *Clasificación de los aceros inoxidable.* Según Norma AISI los aceros inoxidables según su estructura cristalina se clasifican en: Aceros Martensíticos, Aceros Ferríticos, Aceros Austeníticos y Aceros Austenoferríticos.

2.2.11.1 *Aceros inoxidables martensíticos.* Son principalmente aceros con 11.5 y 18% de cromo. Estos aceros son magnéticos, pueden trabajarse en frío sin problemas, pueden maquinarse satisfactoriamente, tienen buena tenacidad, gran resistencia a la corrosión atmosférica y a algunos agentes químicos y se trabajan fácilmente en caliente. De este grupo son los tipos 403, 410, 414, 416, 420, 440A, 501, los tipos 410 y 416 son las más utilizadas (AVNER, 1988).

2.2.11.2 *Aceros inoxidables ferríticos.* Contienen sólo Cromo de 14 a 17% aproximado. Incluye los tipos 405, 430 y 4461, como estos aceros contienen poco carbono, pero más cromo no se puede endurecer por tratamiento térmico. Son magnéticos, tienen resistencia a la corrosión en la condición de recocido. Se usan para profundos estampados de piezas, recipientes para industrias químicas y alimenticias (AVNER, 1988).

2.2.11.3 *Aceros inoxidables austeníticos.* Son aceros al Cromo-Níquel (tipo 3xx) y al Cromo-Níquel-Manganeso (tipo 2xx) que resultan austeníticos; son no magnéticos en la condición de recocido y no endurecen por tratamiento térmico. Su resistencia a la corrosión es mejor que la de los martensíticos y ferríticos (AVNER, 1988).

En el mercado Ecuatoriano se encuentra principalmente el acero inoxidable 304 en forma de planchas, barras, láminas y tubos. Siendo este acero el de mayor utilización para la industria alimenticia.

2.2.11.4 *Acero Inoxidable AISI 304.* El más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el

soldado, tiene buenas características para la soldadura, la resistencia a la corrosión es excelente, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de ambientes corrosivos (SUMITEC, 2010).

Tabla 10. Propiedades del acero inoxidable 304

Propiedades mecánicas	Resistencia a la fluencia 310 Mpa (45KSI) Resistencia máxima 620 Mpa (90 KSI) Elongación 30% (en 50 mm) Reducción de área 40 % Módulo de elasticidad 200 Gpa (29000 KSI)
Propiedades físicas	Densidad 7,8 g/cm ³ (0,28lb/in ³)
Propiedades químicas	0,08 % C mín. 2,00 % Mn 1,00 % Si 18,0 – 20,0 % Cr 8,0 – 10,5 % Ni 0,045 % P 0,03 % S
Usos	Equipos para procesamiento de alimentos, enfriadores de leche, intercambiadores de calor, contenedores de productos químicos, tanques para almacenamiento de vinos y cervezas, partes para extintores de fuego.

Fuente: (SUMITEC, 2010)

2.2.11.5 Aceros inoxidables austenoferríticos (Dúplex). Llamados también bifásicos, permite obtener una estructura mixta de austenita y ferrita con características únicas de resistencia a la corrosión, son magnéticos y generalmente soldables (RODACCIAI, 2012).

2.2.11.6 Aceros galvanizados. Como se la conoce comúnmente, es un procedimiento de aplicación de un recubrimiento de zinc sobre piezas de acero o fundición mediante inmersión de las mismas en un baño de zinc fundido.

Entre los diferentes tipos de acero en la industria alimenticia destacan el AISI 304 y los aceros galvanizados por sus características físico-químicas, entre los cuales el acero de la serie 304 resalta por mejor calidad y resistencia ante la corrosión, presentando buenas propiedades mecánicas, adaptándose a múltiples aplicaciones dentro de la industria.

2.3 Marco metodológico

En este contexto se presenta la propuesta metodológica que se va realizar en el diseño del equipo transportador de granos.

Los pasos para realizar el proceso de diseño son los siguientes:

2.3.1 *Identificación de la necesidad.* La primera fase indica la necesidad del cliente, el enunciado será breve y sin detalle.

2.3.2 *Investigación preliminar.* Esta fase se considera la más importante según (NORTON, 2004), pues es una etapa donde se investiga de manera abierta, los aspectos pertinentes del problema. Además, es pertinente indagar si este, o un problema similar, ya ha sido resuelto con anterioridad. Por lo que la revisión de patentes es un punto importante de considerar, en el proceso de diseño, un sitio web recomendada según (NORTON, 2004) es www.uspto.gov, donde se pueden encontrar patentes por palabra clave, inventor, título, número de patente u otros datos.

2.3.3 *Diseño conceptual.* Es la parte fundamental en el proceso de diseño ya que en esta se generan las posibles opciones a tomar en cuenta para el diseño final, donde se analizan los diferentes conceptos de funcionamiento, opciones de diseño, entre otras, es decir, identificación de los problemas esenciales a tratar, establecer las especificaciones de desempeño, la estructura funcional, el diseño modular, y el aseguramiento de la calidad.

En el proceso de diseño, las especificaciones de desempeño según (NORTON, 2004), define como debe hacer, es decir, comprende la tarea que se deberá realizar, pero, sin que restrinja la libertad del diseño del ingeniero. Según (NORTON, 2004) & (NISBETT, 2008) el propósito es de definir y limitar con cuidado el diseño o tarea, y de esta manera poder lo resolver.

Una de las metodologías más comunes a emplearse para realizar el diseño del transportador neumático de quinua es mediante el diseño conceptual conocida como la matriz QFD (Diseño para la calidad).

Para la elaboración de la matriz QFD o casa de la calidad se necesita conocer la voz del usuario la cual representa las necesidades y requerimientos acerca de la máquina, mediante la voz del usuario se realiza una interpretación técnicamente lo que constituye la voz del ingeniero, esta a su vez busca las posibles soluciones planteadas por el usuario, y finalmente se realiza la evaluación respectiva de los criterios técnicos para determinar cuál es el más ponderante e influyente en el diseño.

Figura 15. Casa de la calidad



Fuente: (<http://es.slideshare.net/chirioska/qfd-casa-de-la-calidad>)

2.3.4 *Diseño preliminar.* Esta etapa es de determinación y concretización de los componentes en su forma específica, materiales propuestos, el tiempo de funcionamiento, las velocidades de los diferentes sistemas, las dimensiones de los planos de conjuntos de dicho diseño, pudiendo ser maquinas simples o complejas. (NISBETT, 2008), en otras palabras, las especificaciones del diseño, es decir, como se debe hacer según (NORTON,

2004).

En el dimensionamiento de los planos de conjunto de la máquina, se aplican las diferentes ecuaciones, extraídas de los diferentes libros de diseño de elementos de máquina y mecanismos.

2.3.5 *Diseño detalle.* En esta fase es de detalle y especificación, en la elaboración de planos, la determinación de etapa de fabricación, los proveedores, establecimiento de los costos de fabricación y construcción. Es la etapa más desarrollada a nivel empresarial (HAMROCK, 2000).

2.3.6 *Documentación.* Esta etapa se recopila toda la información procesada, de forma ordenada, para la presentación final. Aplicación de la norma INEN “Documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación”.

2.3.7 *Solución.* En esta etapa final da la respuesta al problema planteado. En mucho modelo como el planteado en el libro de (NORTON, 2009), es la fase de producción. Pero en este caso se refiere a la exposición final.

2.4 Softwares para el diseño del transportador

Entre los softwares a emplearse para el diseño del transportador son los siguientes: ANSYS, SOLIDWORKS.

2.4.1 *ANSYS.* Es un software para simulación bajo la teoría de elementos finitos empleado para análisis estructural, transferencia de calor, dinámica de fluidos, para la resistencia de materiales, determinación de esfuerzos. Se empleará para la parte de flujo de sólidos en mezcla con aire.

2.4.2 *SOLIDWORKS.* Es un software de diseño asistido por computadora para modelado mecánico en 3D, permite modelar piezas y conjuntos como también la representación de planos, permite la simulación para de esta manera visualizar su funcionamiento.

CAPÍTULO III

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para el análisis y estudio de la selección de alternativas de un sistema de transporte neumático mixto para quinua se requiere seguir un proceso de selección ordenado y adecuado con el fin de garantizar la calidad, durabilidad del sistema, así como del entorno, teniendo en cuenta que cumpla con las especificaciones y parámetros requeridos por el usuario.

3.1 Determinación de las especificaciones y requerimientos

Para determinar las especificaciones y requerimientos de un sistema de transporte neumático mixto para quinua es necesario la utilización de la Ingeniería Concurrente, la cual nos guía para hallar dichos parámetros y especificaciones los cuales ayuden en un correcto diseño.

El sistema de transporte neumático mixto para quinua a diseñar debe poseer todas las especificaciones y requerimientos que el usuario exija, los mismos que ayudaran establecer parámetros técnicos con el objetivo de satisfacer a cabalidad su desempeño y sin provocar daños al producto (RIBA, 2002).

3.1.1 *Requerimientos del usuario.* Tomando en cuenta la voz del usuario lo cual nos proporciona las necesidades que se requieren en un sistema de transporte neumático mixto para quinua, utilizando la observación directa, sugerencias de operadores, se llega a concluir los siguientes.

- Fácil operación
- Absorción total del producto
- Funcionamiento con energía eléctrica
- Rapidez de evacuación
- Cumpla normas de higiene
- Fácil mantenimiento
- No provoque daños al producto

- Sistema silencioso
- No exista desperdicio
- Económico

3.1.2 *Requerimientos técnicos.* Considerando las necesidades del usuario se realiza la interpretación de los requerimientos y se los transforma a características técnicas, por parte del Ingeniero, las cuales son:

- Ergonomía
- Dimensiones de la boquilla de succión
- Caudal de aire adecuado de succión
- Suministro de energía eléctrica
- Producción
- Dimensiones de la válvula dosificadora
- Materiales
- Confiabilidad del sistema
- Velocidad de transporte
- Nivel de ruido aceptable
- Selección de juntas
- Costo del sistema

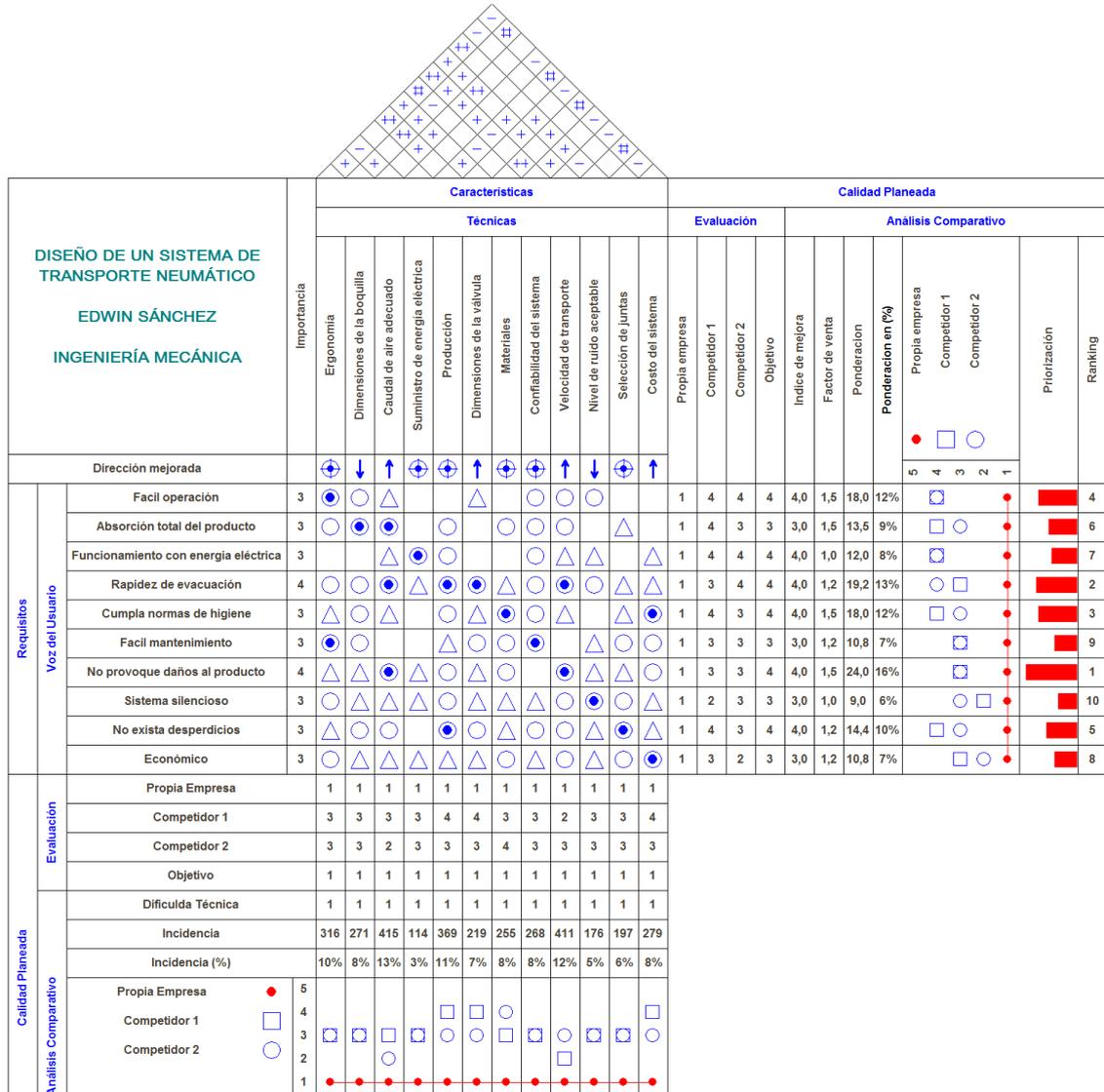
3.1.3 *Resultados de la matriz QFD.* Después de las ponderaciones correspondientes realizadas en la casa de la calidad se puede visualizar los resultados los cuales se muestra en la figura 16, todos los cálculos y procesos realizados para la obtención de dichos resultados fue elaborado utilizando el procedimiento de Carles Riba.

3.1.4 *Conclusiones de la matriz QFD.* Los resultados que se determinaron de mayor prioridad deben ser tomados en cuenta en el momento de la elaboración del diseño del sistema transporte neumático de quinua, a continuación, se enlistan los criterios técnicos de mayor ponderación.

- Caudal de aire adecuado de succión
- Velocidad de transporte
- Producción

- Ergonomía
- Materiales
- Costo

Figura 16. Casa de la calidad del sistema de transporte neumático



Fuente: Autor

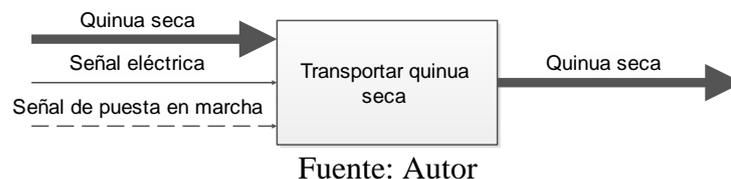
Con el análisis de la función de calidad presentada en la figura 16 se puede visualizar las características más importantes que se deben tomar en cuenta durante el desarrollo del diseño de detalle, de los criterios técnicos enlistados anteriormente se concluye que el caudal de aire es el más importante ya que si no se tiene este parámetro bien definido en el sistema el producto que se requiere transportar no se lograra hacerlo. También existen características menos importantes lo cual no dejan de ser primordiales al momento de tomar en cuenta una alternativa.

3.2 Análisis funcional

Con el objetivo de determinar el análisis funcional del sistema de transporte neumático, hay que tener en cuenta que el producto a transportar es granos de quinua lo cual es la función principal. Para realizar la función objetivo de este sistema hay que considerar otras funciones secundarias las cuales ayudaran a cumplir de manera eficiente el objetivo prioritario. Para identificar las funciones primarias y secundarias se establecen niveles para cada función, entonces la función primaria será de nivel 1 y las funciones secundarias de nivel 2.

La construcción de los diagramas funcionales del sistema de transporte neumático se efectuara considerando simbología aconsejada por la norma alemana VDI 2222, la cual propone que para cada módulo debe existir 3 tipos de entradas y salidas: control, material, energía y en la parte central del recuadro la función principal que debe cumplir el sistema de transporte neumático que se pretende diseñar (RIBA, 2002).

Figura 17. Función principal del sistema de transporte neumático



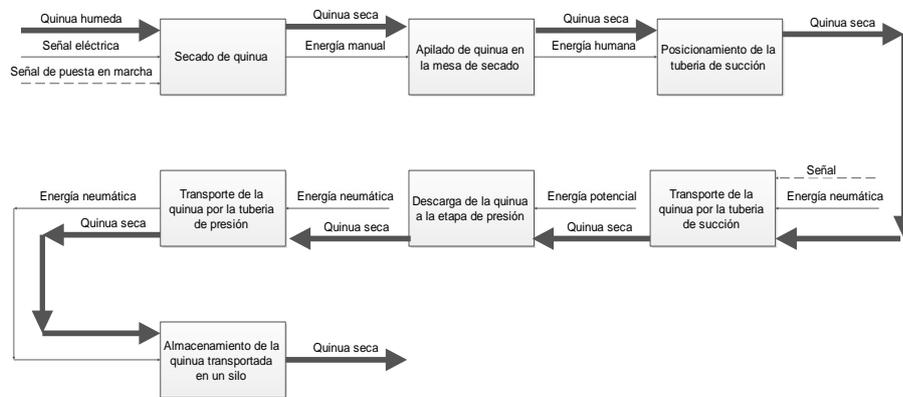
Como se muestra en la figura 17, la función primaria del sistema de transporte neumático es transportar los granos de quinua secos desde un lugar almacenado hacia un deposito u otra área requerida, para ello es necesario de tres señales las cuales deben ingresar y estas son: granos secos de quinua, señal de energía eléctrica y señal de puesta en marcha o control.

Una vez definido el primer nivel se desarrolla el segundo nivel de la estructura funcional en donde se debe considerar todos los parámetros que intervienen para cumplir con total eficiencia la función principal.

En la figura 18 se detallan las diferentes actividades a cumplir para que se de el proceso de transporte del producto a una área o lugar específico.

Para conseguir el objetivo principal es necesario desarrollar otras actividades importantes las cuales constituyen el módulo secundario, desde el secado del producto hasta su almacenamiento en un respectivo silo o deposito diferente.

Figura 18. Función secundaria (Modulo 1)



Fuente: Autor

3.3 Soluciones para el módulo

3.3.1 Soluciones para el módulo 1. Con el análisis de las diferentes actividades que conforman este módulo, se pretende dar una o más soluciones a las diferentes etapas de este, para así obtener una combinación de diferentes alternativas de solución. Las actividades correspondientes al módulo unos son:

- Secado de quinua
- Apilado de la quinua en la mesa de secado.
- Posicionamiento de la tubería de succión en el producto
- Transporte de la quinua por la etapa de succión
- Descarga de la quinua en la etapa de presión
- Transporte de la quinua por la etapa de presión
- Almacenamiento de la quinua transportada

3.3.1.1 Secado de quinua. El cumplimiento de esta primera función en el proceso del transporte de la quinua se lo va a llevar a cabo mediante una máquina secadora de quinua, lo cual después de un determinado tiempo el producto está listo para ser transportado hacia un silo de almacenamiento mediante un sistema de transporte neumático.

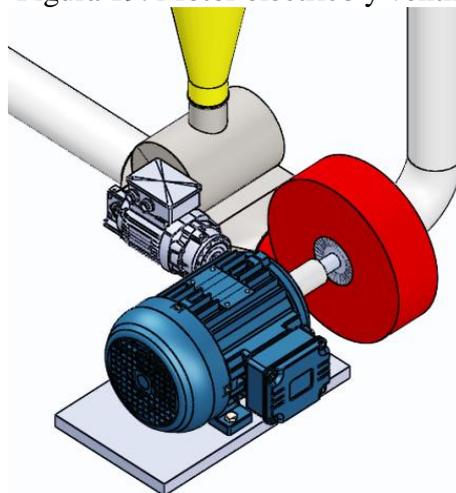
3.3.1.2 *Apilado de la quinua en la mesa de secado.* En el apilado el operado utilizando herramientas construidas en material de grado alimenticio las cuales no contaminen el producto procede apilar en la parte central de la mesa de secado la quinua para su posterior transporte.

3.3.1.3 *Posicionamiento de la tubería de succión en el producto.* Por ser una tarea sumamente fácil se lo realiza por parte del operador mediante el uso de guantes y traje para evitar el contacto con el producto.

3.3.1.4 *Transporte de la quinua por la etapa de succión.* El transporte del producto por la etapa de succión se puede realizar utilizando una unidad generadora de fluido de transporte (aire) ya sea acoplada o no a una fuente de generación de movimiento como un motor eléctrico o de combustión interna.

- Transporte mediante motor eléctrico y ventilador

Figura 19. Motor eléctrico y ventilador



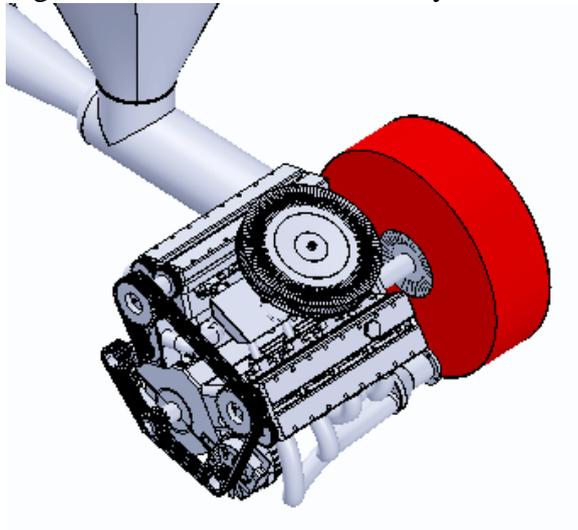
Fuente: Autor

Ventaja: El costo de implementación de un motor con ventilador en el sistema no es elevado, además el caudal es alto lo cual arrastra fácilmente al producto, por otra parte, estos elementos acoplados no producen ruido en exceso.

Desventaja: En el momento del funcionamiento los ventiladores pueden presentar variación de presión lo cual puede ocasionar rozamiento del producto con las paredes de la tubería y se provoque obstrucción y taponamiento del ducto de succión.

- Transporte mediante motor de combustión y ventilador

Figura 20. Motor de combustión y ventilador



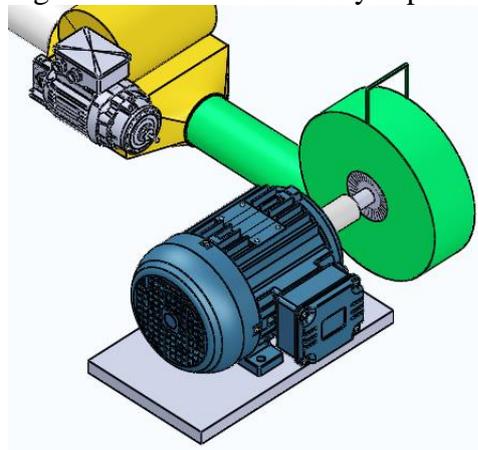
Fuente: Autor

Ventaja: Alta potencia y alto caudal de transporte lo cual no existe riesgo de obstrucción o taponamiento.

Desventaja: Costos elevados por la incorporación de un motor de combustión interna y otros elementos adicionales para la implementación y control del caudal adecuado además el ruido que provocan estos elementos acoplados es alto y podrían ocasionar daños al operador.

- Transporte mediante motor eléctrico y un soplador

Figura 21. Motor eléctrico y soplador



Fuente Autor

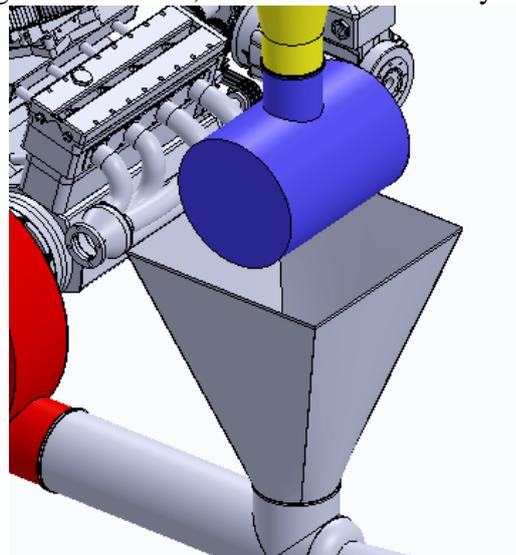
Ventaja: En el funcionamiento no existe mucha variación de caudal lo cual hace seguro su utilización en fases diluidas del producto teniendo así un riesgo mínimo de obstrucción y taponamiento

Desventaja: El costo del soplador es más elevado que el de un ventilador lo cual incrementa el costo total del sistema de transporte neumático.

3.3.1.5 *Descarga de la quinua en la etapa de presión.* Para la descarga del producto en la etapa de presión se puede realizar con un ciclón y diferentes elementos los cuales permitan la adecuada descarga hacia esa etapa.

- Con ciclón, válvula dosificadora y tolva de descarga

Figura 22. Ciclón, válvula dosificadora y tolva



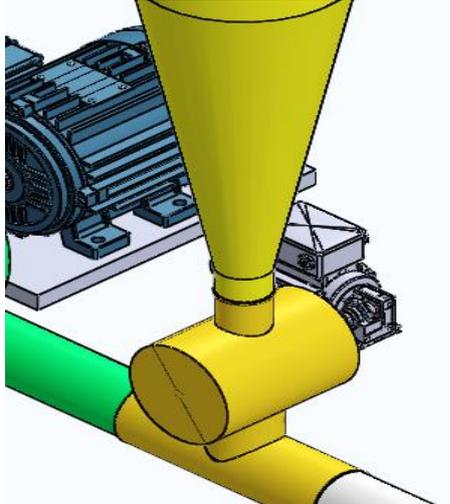
Fuente: Autor

Ventajas: Con la implementación de una tolva de descarga se garantiza que todo el producto caiga en la etapa de presión y no exista pérdidas del producto lo cual es requerimiento del usuario.

Desventaja: Al momento de la implementación de una tolva el producto queda expuesto hacia el ambiente, existiendo una posibilidad de contaminación cruzada.

- Con ciclón, válvula dosificadora y tubería de descarga

Figura 23. Ciclón, válvula dosificadora y tubería de descarga



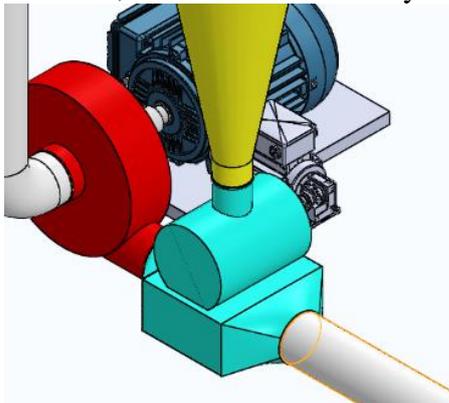
Fuente: Autor

Ventajas: Al tener menos elementos para esta actividad a realizar se vuelve un sistema más económico.

Desventajas: El acople a la etapa de presión debe ser de calidad, si no es así el producto podría desperdiciarse y la capacidad de producción disminuiría.

- Con ciclón, válvula dosificadora y Venturi

Figura 24. Ciclón, válvula dosificadora y Venturi



Fuente: Autor

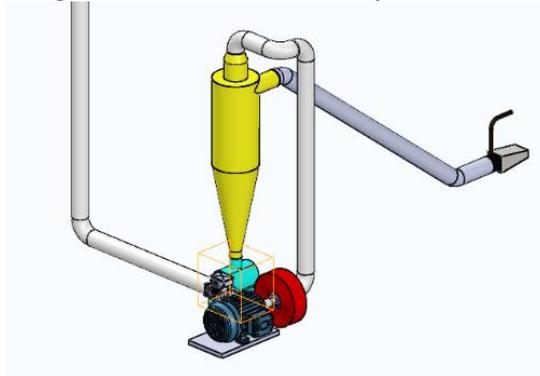
Ventajas: Con la implementación de un Venturi en la etapa de presión se asegura que el producto se transporte.

Desventajas: Hay que incorporar un Venturi en la tubería de presión lo cual el costo aumenta.

3.3.1.6 Transporte de la quinua por la etapa de presión. Esta actividad en el proceso de transporte por la etapa de presión se puede realizar con la misma unidad de la succión o con unidades independientes.

- Motor eléctrico y ventilador (la misma unidad de la succión)

Figura 25. Motor eléctrico y ventilador



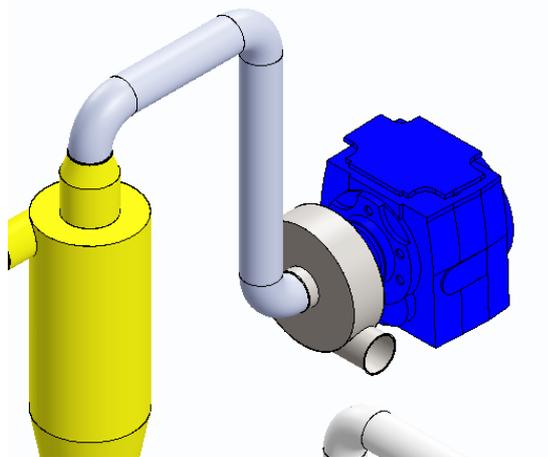
Fuente: Autor

Ventajas: Al utilizar la misma unidad tanto para la etapa de succión y presión reduce el costo en la implementación del sistema.

Desventajas: El caudal del fluido de transporte puede disminuir ya que es el mismo tanto para la etapa de succión y presión por lo cual habría pérdidas de presión y no se llegaría a cumplir con la función principal.

- Motor de combustión interna y ventilador (unidad independiente para la presión)

Figura 26. Motor de combustión interna y ventilador



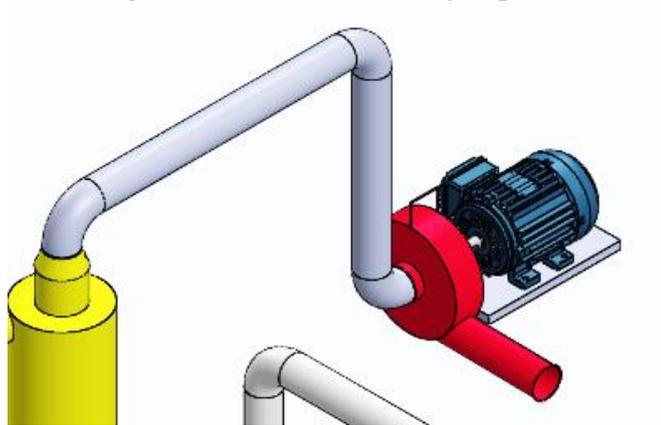
Fuente: Autor

Ventaja: Se asegura el caudal y la presión necesaria para el transporte de la quinua esto debido al motor de combustión interna.

Desventaja: Debido a la utilización de un motor de combustión el ruido es demasiado alto.

- Motor eléctrico y soplador (unidad independiente para la presión)

Figura 27. Motor eléctrico y soplador



Fuente: Autor

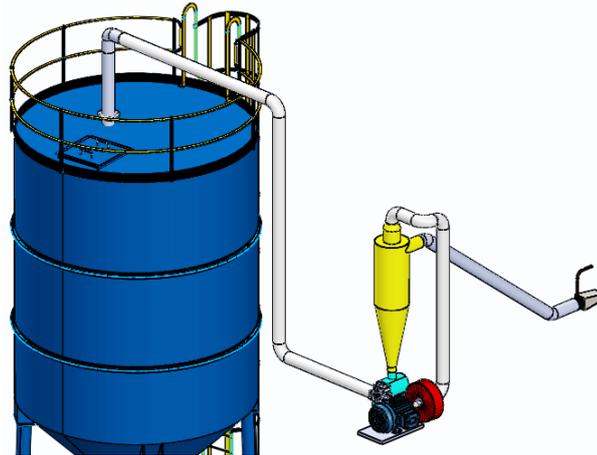
Ventaja: Con el soplador se puede obtener un caudal y una presión adecuada lo cual permite el transporte del producto eficientemente además como es una unidad solo para la etapa de presión se asegura una mínima variación de presión y por tanto pérdida de energía insignificante asegurando el transporte y no el taponamiento de la tubería de presión.

Desventaja: Ya que se incorpora una unidad individual para la etapa de presión el costo en el sistema total de transporte aumenta, así como el nivel de ruido ya que son dos unidades en funcionamiento.

3.3.1.7 Almacenamiento de la quinua. Para el almacenamiento de la quinua se utiliza un silo el cual recolecta toda la capacidad de producción del sistema de transporte o también recipientes como lonas.

- Almacenamiento en silo

Figura 28. Almacenamiento en silo



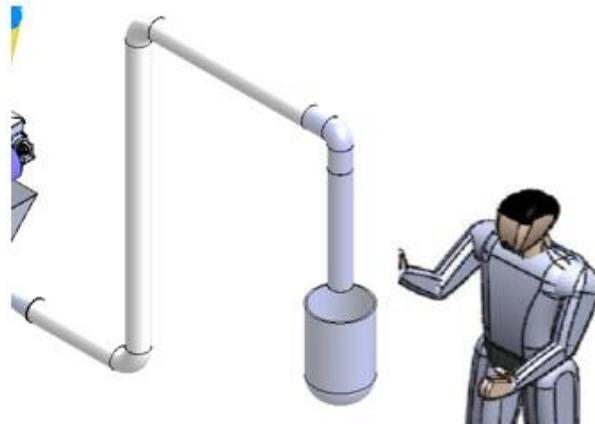
Fuente: Autor

Ventajas: Con un silo se puede almacenar todo el producto en un solo lugar libre de impurezas o contaminación ya que es un recipiente cerrado.

Desventajas: El costo para la implementación de un silo de almacenamiento es elevado debido a sus dimensiones grandes para el almacenamiento de todo el producto

- Almacenamiento en lonas

Figura 29. Almacenamiento manual en lonas



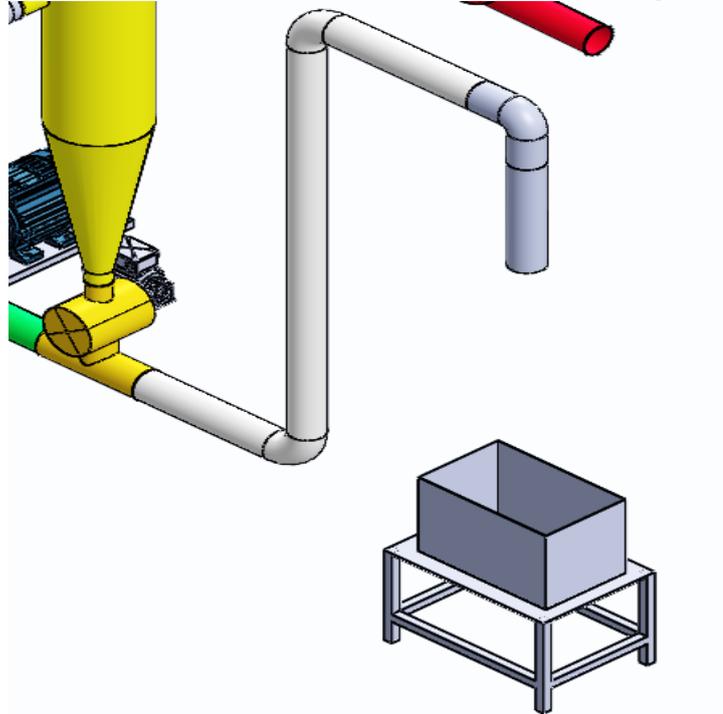
Fuente: Autor

Ventaja: No representa costo elevado ya que el operador se encarga de almacenar la quinua en la cantidad deseada.

Desventaja: Se necesita intervención del operador, por tal razón hay contacto directo con el producto y en la actividad realizada se puede producir contaminación.

Almacenamiento en contenedor rectangular

Figura 30. Almacenamiento en un contenedor rectangular



Fuente: Autor

Ventaja: En este recipiente se puede almacenar toda la producción y no es necesario la intervención del operario.

Desventaja: Como es un recipiente abierto al ambiente podría ocasionar contaminación por polvo u otros elementos ajenos al producto además el costo de implementación es más elevado.

3.4 Matriz morfológica

Con las diferentes soluciones proporcionadas a cada actividad del módulo 1 se integra la matriz morfológica la cual combina las distintas soluciones, para así poder obtener diferentes equipos o sistemas de transporte neumático los cuales ayudaran a la obtención de la solución más adecuado.

Después de las combinaciones posibles en la matriz morfológica se obtienen las distintas soluciones como resultados donde se puede apreciar tres distintos sistemas de transporte neumático como soluciones los cuales se muestran en figura 31.

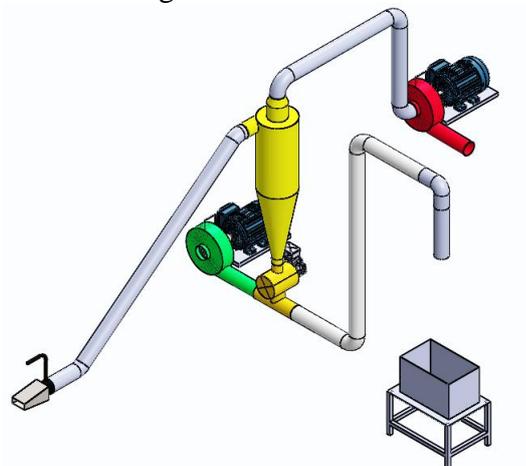
Figura 31. Matriz morfológica para el sistema de Transporte Neumático

Función	Componente		
Secado de quinua	Máquina secadora		
Apilado de quinua en la mesa de secado	Apilamiento manual		
Posicionamiento de la tubería de succión en el producto	Posicionamiento manual		
Transporte de la quinua por la etapa de succión	Motor eléctrico y soplador	Motor de combustión y ventilador	Motor eléctrico y ventilador
Descarga de la quinua en la etapa de presión	Ciclón, válvula y tubería	Ciclón, válvula y tolva	Ciclón, válvula y venturi
Transporte de la quinua por la etapa de presión	Motor eléctrico y soplador (UI)	Motor de combustión y ventilador (UI)	Motor eléctrico y ventilador (MU)
Almacenamiento de la quinua transportada en un silo	Recipiente rectangular	Lonas	Silo
Soluciones	Solución 1	Solución 2	Solución 3

Fuente: Autor

3.4.1 Solución 1. El sistema presentado como primera solución necesita de una unidad de potencia para la etapa de succión, a la vez posee un ciclón, válvula y Venturi para la descarga de quinua en la etapa de presión. Para el transporte de la quinua por la etapa de presión se necesita de una unidad adicional para cumplir con esta actividad, para finalmente realizar el almacenamiento del producto en un recipiente rectangular.

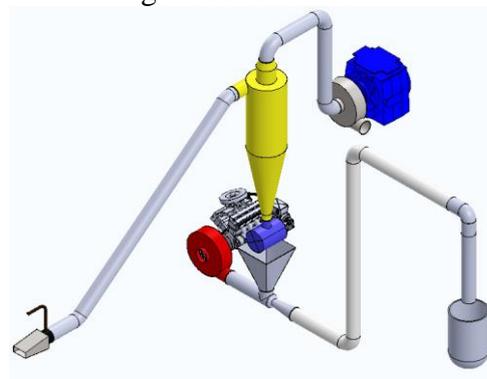
Figura 32. Solución 1



Fuente: Autor

3.4.2 Solución 2. El sistema presentado como segunda solución posee dos unidades de generación de fluido transportador a través de un motor de combustión interna y un ventilador tanto para la etapa de succión y presión, para la descarga del producto es necesario de un ciclón, válvula y la tubería, esta debe estar acoplada muy bien para evitar desperdicios. Para el transporte en la etapa de presión se realiza con diferente unidad de generación de fluido transportador. El almacenamiento de producto se realiza de manera manual por parte del operador en recipientes pequeños como lonas lo cual causa trabajo adicional.

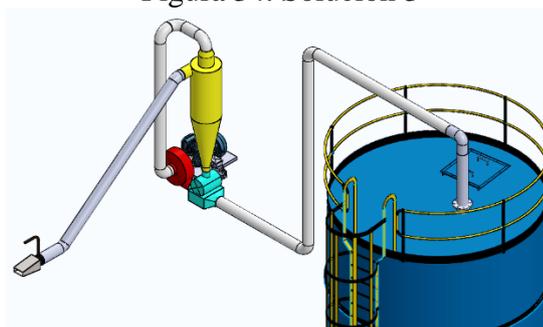
Figura 33. Solución 2



Fuente: Autor

3.4.3 Solución 3. El sistema presentado como una tercera solución contiene un motor eléctrico y un ventilador el cual genera el fluido de transporte, además para la descarga del producto en la etapa de presión posee un ciclón una válvula dosificadora y un Venturi. La cual da una descarga apropiada sin turbulencia en la línea de presión. Para la etapa de presión se utiliza la misma unidad generadora de aire lo cual no aumenta el costo en el sistema, además el almacenamiento del producto se lo realiza en un silo para evitar contaminación.

Figura 34. Solución 3



Fuente: Autor

3.5 Evaluación de soluciones

Después de obtener las diferentes alternativas de solución mediante la matriz morfológica, se debe realizar una evaluación de las mismas para la posterior toma de decisiones.

La evaluación no se lo realiza en base a un determinado elemento, puesto que hay que tomar en cuenta distintos aspectos del sistema a diseñar. Los valores para la evaluación están en base a criterios que involucran juicios de valor numérico los cuales pueden ir desde cero a uno.

Para la evaluación se utiliza el método ordinal corregido de criterios ponderados. La evaluación se basa en tablas donde cada criterio se confronta con los restantes criterios e igualmente se procede con las distintas soluciones y se asignan los valores siguientes:

Si el criterio o solución de las filas es mayor que el de las columnas, se da el valor de 1.

Si el criterio o solución de las filas es igual al de las columnas, se da el valor de 0,5.

Si el criterio o solución de las filas es menor que el de las columnas, se da el valor de 0.

Posteriormente, para cada solución se debe sumar los valores asignados en relación a las restantes soluciones al que se le añade una unidad, para evitar que la solución menos favorable tenga una valoración nula; después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada solución.

En la evaluación final para cada solución resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio (RIBA, 2002).

3.5.1 Evaluación de criterios. Para la evaluación de los criterios se realiza tomando en cuenta el método ordinal corregido de criterios ponderados obteniéndose así la ponderación correcta para cada criterio, estos valores nos ayudan posteriormente a hallar la mejor alternativa de solución.

Tabla 11. Evaluación de criterios

Caudal de aire > Velocidad de transporte > Producción > Ergonomía > Materiales = Costo								
Criterio	Caudal de aire	Velocidad de transporte	Producción	Ergonomía	Materiales	Costo	$\Sigma +1$	Ponderación
Caudal de aire	1	1	1	1	1	1	6	0,285
Velocidad de transporte	0	1	1	1	1	1	5	0,238
Producción	0	0	1	1	1	1	4	0,190
Ergonomía	0	0	0	1	1	1	3	0,142
Materiales	0	0	0	0	0,5	1,5	1,5	0,071
Costo	0	0	0	0	0,5	1,5	1,5	0,071
Suma							21	1

Fuente: Autor

3.5.2 *Evaluación de cada solución con respecto a los criterios.* Igualmente, para la evaluación de cada solución con respecto a los criterios se hace uso del método ordinal corregido de criterios ponderados, así como en la tabla 11.

Tabla 12. Evaluación de soluciones respecto al caudal de aire

Solución 1 = Solución 2 > Solución 3					
Caudal de aire	Solución 1	Solución 2	Solución 3	S+1	Ponderación
Solución 1	1	0,5	1	2,5	0,417
Solución 2	0,5	1	1	2,5	0,417
Solución 3	0	0	1	1	0,167
Suma				6	1,000

Fuente: Autor

En la tabla 12 se evaluó con una ponderación mayor a la solución 2, que brinda en el sistema el caudal más adecuado de aire para el transporte del producto, debido a que posee dos fuentes de aire independientes, tanto para la succión como para la descarga.

Tabla 13. Evaluación de soluciones respecto a la velocidad de transporte

Solución 3 > Solución 1 = Solución 2					
Velocidad de transporte	Solución 1	Solución 2	Solución 3	S+1	Ponderación
Solución 1		0,5	0	1,5	0,250
Solución 2	0,5		0	1,5	0,250
Solución 3	1	1		3	0,500
Suma				6	1

Fuente: Autor

Con el objetivo de evitar el daño tanto en el sistema como en el producto, la solución tres garantiza la velocidad de transporte más adecuada por lo cual se la pondera con el mayor valor numérico respecto a las otras soluciones.

Tabla 14. Evaluación de soluciones respecto a la producción

Solución 3 = Solución 1 = Solución 2					
Producción	Solución 1	Solución 2	Solución 3	S+1	Ponderación
Solución 1		0,5	0,5	2	0,333
Solución 2	0,5		0,5	2	0,333
Solución 3	0,5	0,5		2	0,333
Suma				6	1

Fuente: Autor

Con los pre diseños obtenidos se puede evaluar con la mayor ponderación a las tres soluciones ya que todas son eficientes en la producción.

Tabla 15. Evaluación de soluciones respecto a la ergonomía

Solución 3 > Solución 1 > Solución 2					
Ergonomía	Solución 1	Solución 2	Solución 3	S+1	Ponderación
Solución 1		1	0	2	0,333
Solución 2	0		0	1	0,167
Solución 3	1	1		3	0,500
Suma				6	1

Fuente: Autor

La evaluación en este caso fue realizada tomando en cuenta a la solución 3 con la mayor ponderación ya que posee una ergonomía que se adapta al sitio de trabajo y el operador, lo cual brinda una mayor confiabilidad en el rendimiento del sistema.

Tabla 16. Evaluación de soluciones respecto al material

Solución 1 = Solución 2 = Solución 3					
Materiales	Solución 1	Solución 2	Solución 3	S+1	Ponderación
Solución 1		0,5	0,5	2	0,333
Solución 2	0,5		0,5	2	0,333
Solución 3	0,5	0,5		2	0,333
Suma				6	1

Fuente: Autor

Como es un producto alimenticio el cual se lo va a transportar las tres soluciones se ponderan con la misma calificación puesto que cuentan con el mismo material para su implementación.

Tabla 17. Evaluación de soluciones respecto al costo

Solución 3 > Solución 1 > Solución 2					
Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	S+1	Ponderación
Solución 1		1	0	2	0,333
Solución 2	0		0	1	0,167
Solución 3	1	1		3	0,500
Suma				6	1

Fuente: Autor

En cuanto al costo se ha ponderado con la mayor calificación al sistema menos costoso el cual es la solución 3, ya que a diferencia de las otras soluciones esta conlleva menos elementos constitutivos.

3.5.3 Conclusiones. En la tabla 18 se presenta la evaluación final de las tres soluciones encontradas en la matriz morfológica, esta evaluación se lo realiza mediante el método de los criterios ponderados y se determina como solución más adecuada la número 3.

Tabla 18. Conclusiones

Conclusión	Caudal de aire	Velocidad de transporte	Producción	Ergonomía	Materiales	Costo	S	Prioridad
Solución 1	0,119	0,060	0,063	0,047	0,024	0,02367	0,336	2
Solución 2	0,119	0,060	0,063	0,024	0,024	0,01183	0,301	3
Solución 3	0,048	0,119	0,063	0,071	0,024	0,0355	0,360	1

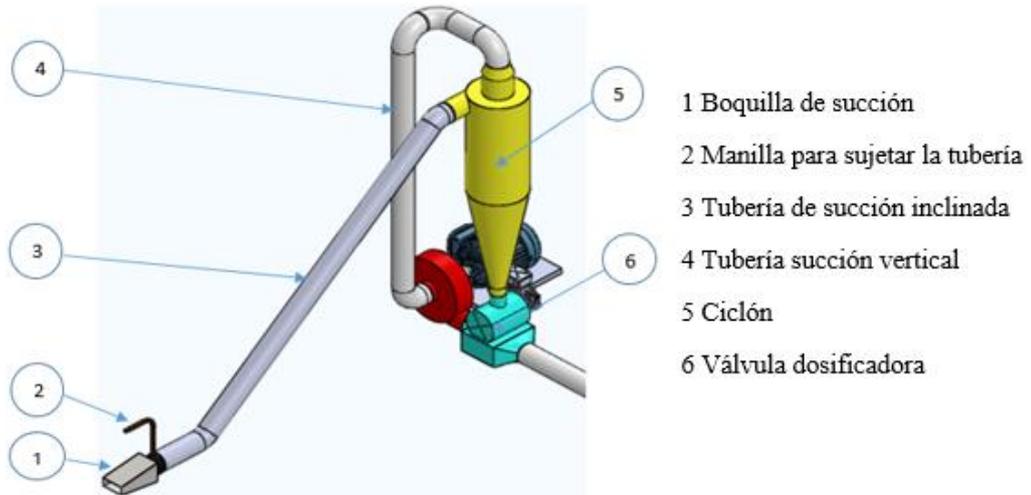
Fuente: Autor

Terminada la evaluación mediante los respectivos criterios se llega a concluir que la solución 3 es la mejor alternativa con respecto a las otras. El sistema de transporte neumático que mejor solución posee una sola unidad generadora de fluido de transporte (aire) tanto para la etapa de succión y presión, la cual hace un sistema no muy complejo para la operación, económico, ergonómico y seguro para el operador. Además, se incorpora un silo de almacenamiento cerrado para que el producto esté libre de impurezas y contaminación.

3.5.4 *Características y elementos de conformación del sistema de transporte.* Con la solución determinada anteriormente se definen todos los componentes que la conforman. Para identificar la mejor alternativa se evalúa cada solución con respecto a los requerimientos más importantes que se generó en la casa de la calidad (QFD) y de ello se tiene como mejor alternativa la solución 3, en esta se presentan todas las soluciones a los requerimientos y necesidades del auspiciante.

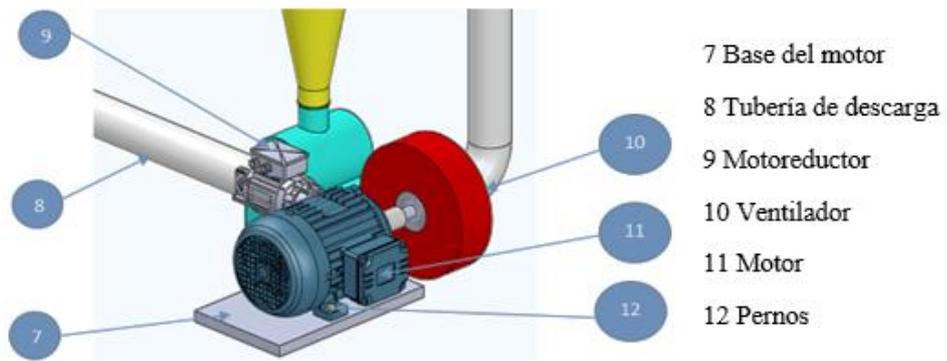
En las siguientes figuras se detallan todos los elementos que conforman la solución más óptima para su posterior diseño de detalle.

Figura 35. Componentes externos del sistema de transporte



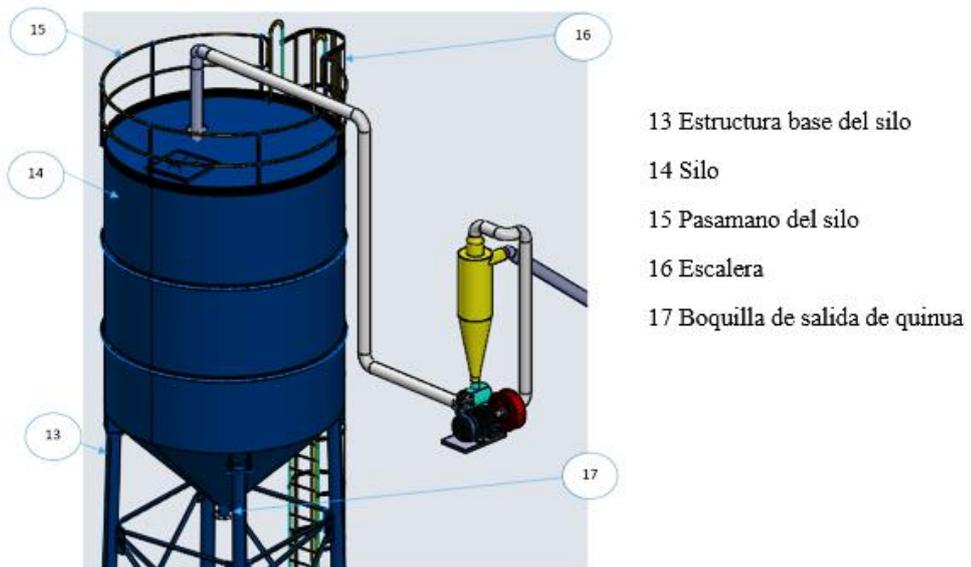
Fuente: Autor

Figura 36. Componentes externos del sistema de transporte



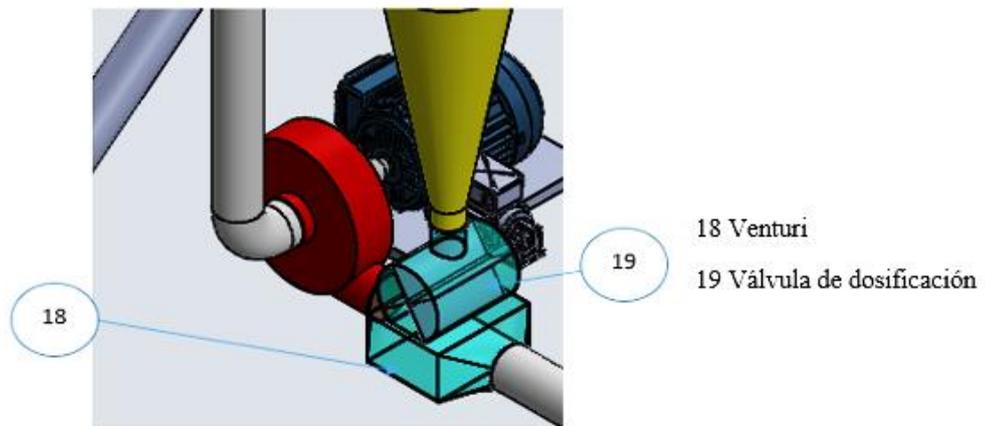
Fuente: Autor

Figura 37. Componentes externos del sistema de transporte



Fuente: Autor

Figura 38. Componentes internos del sistema de transporte



Fuente: Autor

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO DE DOS ETAPAS MIXTO PARA QUINUA CON CAPACIDAD DE 40 QUINTALES HORA

Concluido con el análisis de alternativas y obteniéndose así la configuración final del sistema de transporte neumático se procede al diseño del mismo, lo cual conlleva el dimensionamiento, diseño mecánico y la selección de todos los componentes necesarios que intervienen en este sistema, para luego proceder con la simulación, así como también la verificación y validación de los resultados obtenidos teóricamente. Para la simulación y comparación de resultados se utilizará el software Ansys.

4.1 Requerimientos para el diseño

Para el diseño del sistema de transporte neumático es necesario parámetros de entrada o también dicho datos del problema los cuales fueron determinados tomando en cuenta la voz del usuario.

- Capacidad de transporte de 1818 kg/h
- Distancia de transporte

Etapa de succión: Longitud horizontal 3 m y longitud vertical 3 m

Etapa de presión: Longitud horizontal 3 m y longitud vertical 3 m

- Propiedades del material a transportar (quinua)

Diámetro de la quinua 1,73 mm

Densidad real 1220 kg/m³

Densidad aparente 680 Kg/m³

- Fluido de transporte (aire)

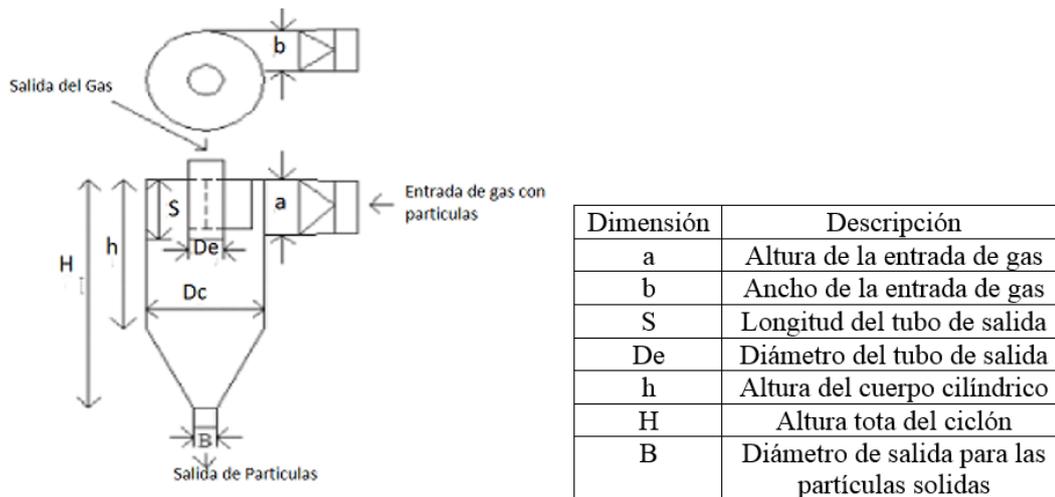
Densidad 0,95 Kg/m³

4.2 Diseño del ciclón

En el diseño del ciclón hay que tener en cuenta el comportamiento que va a tener con el producto durante el transporte, esto debido al tamaño del grano de la quinua además la

configuración de entrada y salida del gas de transporte, igualmente haciendo caso a las referencias del usuario el ciclón por necesidad debe tener entrada tangencial y salida axial del gas de transporte, por otra parte, el tamaño del grano de la quinua es mayor 20 micrómetros por tal razón se escoge un ciclón para diseñar de la familia de ciclones convencionales a de tipo Zenz.

Figura 39. Dimensiones generales para ciclones



Fuente: (MILLS, 2004)

4.2.1 *Diseño geométrico del ciclón tipo zenz.* Para el dimensionamiento del ciclón el primer paso es determinar su diámetro, para ello se hace uso de la ecuación 1 la cual define el área de entrada del ciclón para posteriormente obtener el diámetro.

$$A_{ec} = \frac{Q_g}{V_{ec}} \quad (1)$$

Dónde:

A_{ec} = Área de entrada del ciclón [m²]

Q_g = Caudal de aire [m³/h]

V_{ec} = Velocidad de entrada (gas) [m/s]

4.2.1.1 *Cálculo del caudal de aire de entrada al ciclón.* Para determinar el caudal de aire se utiliza las siguientes ecuaciones las cuales se combinan.

$$\dot{M}_g = \frac{\dot{M}_s}{\mu} \quad (2)$$

$$Q_g = \frac{\dot{M}_g}{\rho_g} \quad (3)$$

Dónde:

\dot{M}_s = Flujo másico del material (sólido) [Kg/h]

\dot{M}_g = Flujo másico del aire (gas) [Kg/h]

ρ_g = Densidad del aire (gas) [Kg/m³]

μ = Relación másica

Para la relación másica se supone un valor de 10, este valor está estimado en los límites de fluidización que van entre 1 a 15 entre material y gas con el fin de tener un transporte bastante diluido, el flujo másico del solido se aumenta a un número empírico para tener datos observables en la geometría del ciclón, entonces el caudal de entrada reemplazando la ecuación 2 en la ecuación 3 es:

$$Q_g = \frac{\dot{M}_s}{\mu * \rho_g} \quad (4)$$

$$Q_g = \frac{8550 \text{ kg/h}}{10 * 0,95 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q_g = 900 \text{ m}^3/\text{h}$$

Utilizando la ecuación 1 se tiene:

$$A_{ec} = \frac{900 \text{ m}^3/\text{h}}{10 \text{ m/s}}$$

$$A_{ec} = 0,025 \text{ m}^2$$

4.2.1.2 *Cálculo del diámetro del ciclón.* Con el área calculada se procede a determinar el diámetro del ciclón haciendo uso de los parámetros investigados anteriormente en el marco referencial para ciclones convencionales.

$$A_{ec} = a * b \quad (5)$$

$$A_{ec} = 0,5 * D_c * 0,25 * D_c \quad (6)$$

Dónde:

a= Altura de la entrada de gas [m]

b= Ancho de la entrada de gas [m]

D_c = Diámetro del ciclón [m]

Despejando el diámetro del ciclón de la ecuación 6 se obtiene la siguiente expresión la cual queda:

$$D_c = \sqrt{8 * A_{ec}} \quad (7)$$

$$D_c = \sqrt{8 * 0,025 m^2}$$

$$D_c = 0,45m$$

4.2.1.3 Dimensiones del ciclón. Con el diámetro del ciclón definido se calcula las demás dimensiones de este elemento tomando en cuenta las relaciones para ciclones tipo Zenz. (ANEXO E)

Altura de entrada al ciclón (a) 0,23 m

Ancho de entrada del ciclón (b) 0,112 m

Altura de salida del ciclón (S) 0,34 m

Diámetro de salida del ciclón (D_e) 0,23 m

Altura de la parte cilíndrica del ciclón (h) 0,9 m

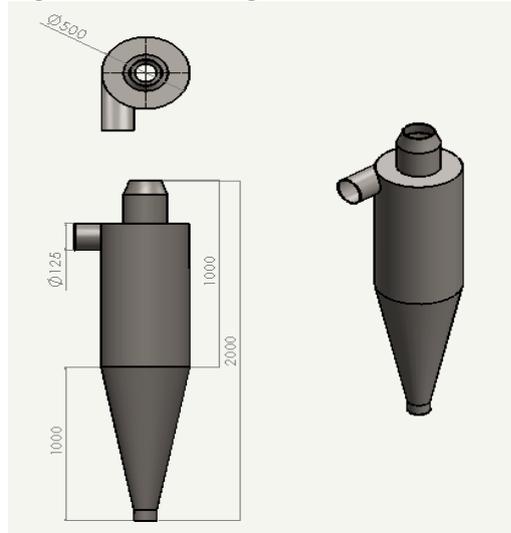
Altura de la parte cónica del ciclón (z) 0,9 m

Altura total del ciclón (H) 1,8 m

Diámetro de salida del polvo (B) 0,112 m

En la figura 40 se puede visualizar las dimensiones calculadas anteriormente para el ciclón tipo Zenz.

Figura 40. Diseño geométrico del ciclón



Fuente: SolidWorks 2015

4.2.1.4 *Cálculo de la resuspensión.* Después de obtener las dimensiones del ciclón se calcula si existe o no resuspensión. Utilizando la siguiente condición.

$$\frac{V_{ec}}{V_s} < 1,35 \quad (8)$$

Dónde:

V_s = Velocidad de saltación [m]

4.2.1.5 *Velocidad de saltación.* La velocidad de saltación se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$V_s = \left(\frac{4 \cdot \dot{M}_s \cdot 10^\alpha \cdot g^{\frac{\beta}{2}} \cdot D_{ts}^{\left(\frac{\beta}{2}-2\right)}}{\pi \cdot \rho_g} \right)^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (9)$$

Dónde:

V_s = Velocidad de saltación [m/s]

$\alpha = 1440 \cdot D_p + 1,96$

$\beta = 1100 \cdot D_p + 2,5$

D_p = Diámetro de la partícula a transportar (quinua) [m]

g = Aceleración de la gravedad [m/s²]

D_{ts} = Diámetro de la tubería [m]

Para el cálculo de la velocidad de saltación se asume un diámetro de 6 pulgadas.

$$\alpha = 1440 * 0,00173 + 1,96$$

$$\alpha = 4,45$$

$$\beta = 1100 * D_p + 2,5$$

$$\beta = 4,4$$

Entonces la velocidad de saltación es:

$$V_s = \left(\frac{4 * 8550 \text{ kg/h} * 10^{(4,45)} * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{m}^2}\right)^{\left(\frac{4,4}{2}\right)} * (0,1524 \text{ m})^{\left(\frac{4,4}{2}-2\right)}}{\pi * 0,95 \text{ kg/m}^3} \right)^{\left(\frac{1}{4,4+1}\right)}$$

$$V_s = 88,83 \text{ m/s}$$

Con resultados anteriores y la ecuación 8 verificamos si hay o no resuspensión en el ciclón.

$$\frac{10 \text{ m/s}}{88,83 \text{ m/s}} < 1,35$$

$$0,1 < 1,35$$

Con el valor anterior obtenido se indica que no existe resuspensión por tal razón el diámetro y las demás medidas determinadas del ciclón son las adecuadas para este elemento.

4.3 Determinación del diámetro de tubería de succión y presión

Para determinar el diámetro de la tubería tanto en la etapa de succión como en la etapa de descargas es indispensable contar con datos de entrada que ayuden a determinar la selección de la tubería adecuada para el sistema de transporte neumático como: capacidad a transportar, velocidad del gas entre otras.

4.3.1 *Determinación del diámetro de tubería en la etapa de succión.* Se empieza asumiendo un diámetro con la cual se espera tener una relación másica diluida y a la vez que no existan pérdidas muy grandes con el ese diámetro. El diámetro que se asume es de 6 pulgadas.

4.3.1.1 *Flujo másico del material en la etapa de succión.* Como la capacidad del sistema a transportar es de 40 quintales por hora esto se lo transforma para tener en kilogramos segundos.

$$\dot{m}_s = 40 \frac{qq}{h} * \frac{45,45 \text{ rad}}{1 \text{ qq}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0,505 \frac{kg}{s}$$

Dónde:

\dot{m}_s = Flujo másico del material [kg/s]

4.3.1.2 *Área de tubería de succión.* Para calcular el área de la tubería de succión hacemos uso del diámetro supuesto de 6 pulgada y realizamos el cálculo con la siguiente expresión.

$$A_{ts} = \frac{\pi}{4} * D_t^2 \quad (10)$$

Dónde:

A_{ts} = Área de tubería de succión [m²]

$$A_{ts} = \frac{\pi}{4} * (0,1524 \text{ m})^2$$

$$A_{ts} = 18,24 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

4.3.1.3 Caudal de aire en succión. Se calcula el caudal de aire que es necesario para el transporte de la quinua en la etapa de succión.

$$Q_{gs} = V_{gr} * \varepsilon * A_{ts} \quad (11)$$

Dónde:

Q_{gs} = Caudal de gas en succión [m^3/s]

V_{gr} = Velocidad de transporte recomendado [m/s]. Anexo A

ε = Porosidad

- Porosidad. La porosidad es necesario para la obtención de caudal de la succión lo cual se calcula mediante la ecuación 12.

$$\varepsilon = \frac{\rho_s}{\rho_s + \frac{\rho_g}{\rho_s}} \quad (12)$$

Dónde:

ρ_s = Densidad del producto aparente (quinua) [kg/m^3]

$$\varepsilon = \frac{680 \text{ kg}/\text{m}^3}{680 \text{ kg}/\text{m}^3 + \frac{0,95 \text{ kg}/\text{m}^3}{680 \text{ kg}/\text{m}^3}}$$

$$\varepsilon = 0,99$$

Con la porosidad determinada y los demás valores encontrados antes se calcula el caudal de gas en la succión.

$$Q_{gs} = 10 \text{ m}/\text{s} * 0,99 * 18,24 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q_{gs} = 0,1806 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.3.1.4 *Flujo másico gas en succión.* Se calcula el flujo másico de aire en succión para determinar posteriormente la relación másica y así definir si se lograra un óptimo transporte de quinua en la succión.

$$\dot{m}_{gs} = Q_{gs} * \rho_g \quad (13)$$

Dónde:

\dot{m}_{gs} = Flujo másico en succión [kg/s]

$$\dot{m}_{gs} = 0,1806 \text{ m}^3/\text{s} * 0,95 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\dot{m}_{gs} = 0,1716 \text{ kg}/\text{s}$$

4.3.1.5 *Relación másica.* Finalmente se calcula la relación másica y así definir si el transporte del producto con el diámetro asumido es adecuado o no.

$$\mu_s = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{gs}} \quad (14)$$

Dónde:

μ_s = Relación másica en succión

$$\mu_s = \frac{0,505 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,1716 \text{ kg}/\text{s}}$$

$$\mu_s = 2,94$$

Con el cálculo realizado tenemos un valor de relación másica de 2,94 lo cual nos indica un transporte entre producto y gas (aire) muy diluido, por tal razón no habrá muchas pérdidas con el diámetro asumido.

4.3.2 *Selección de la tubería de succión.* La tubería de succión seleccionada es de un diámetro de 6 pulgadas en acero inoxidable 304 sin costura, seleccionada del catálogo de

Acinox (anexo A) la cual trabaja excelentemente a las solicitudes del sistema.

4.3.3 *Determinación del diámetro de tubería en la etapa de presión.* Igualmente, como en la etapa de succión se asume un diámetro para la tubería de presión y se calculan todos los parámetros necesarios para así determinar si existe un adecuado transporte del fluido (aire) y el producto, para este caso se asume un diámetro de 8 pulgadas. Se espera tener un flujo aún más diluido ya que el diámetro es mayor que en el de succión.

4.3.3.1 *Flujo másico del material en etapa de presión.* El flujo másico es igual en etapa de succión como en la etapa de presión.

$$\dot{m}_s = 0,505 \frac{kg}{s}$$

4.3.3.2 *Área de tubería de presión.* Con el diámetro asumido de 8 pulgadas para la tubería de la etapa de presión se procede con el cálculo del área, igual como se realizó en la etapa de succión.

$$A_{tp} = \frac{\pi}{4} * D_{tp}^2 \quad (15)$$

Dónde:

A_{tp} = Área de tubería de presión [m²]

D_{tp} = Diámetro de tubería de presión [m]

$$A_{tp} = \frac{\pi}{4} * (0,2032 \text{ m})^2$$

$$A_{tp} = 0,0324 \text{ m}^2$$

4.3.3.3 *Caudal de aire en presión.* Con el área de tubería en la etapa de presión se calcula el caudal necesario para el transporte de quinua en la etapa de presión.

$$Q_{gp} = V_{gr} * \varepsilon * A_{tp} \quad (16)$$

Dónde:

Q_{gp} = Caudal de gas en succión [m^3/s]

Para el cálculo del caudal en la etapa de presión, los valores de la velocidad y de la porosidad son los mismos de la succión.

$$Q_{gp} = 10 \text{ m/s} * 0,99 * 0,0324 \text{ m}^2$$

$$Q_{gp} = 0,3210 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.3.3.4 *Flujo másico en la presión.* El flujo másico se lo determina de la misma manera que en la succión.

$$\dot{m}_{gp} = Q_{gp} * \rho_g \quad (17)$$

Dónde:

\dot{m}_{gp} = Flujo másico en presión [kg/s]

$$\dot{m}_{gp} = 0,3210 \text{ m}^3/\text{s} * 0,95 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\dot{m}_{gp} = 0,3049 \text{ kg}/\text{s}$$

4.3.3.5 *Relación másica.* Para determinar este parámetro se utiliza la siguiente ecuación:

$$\mu_p = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{gp}} \quad (18)$$

Dónde:

μ_p = Relación másica en presión

$$\mu_p = \frac{0,505 \text{ kg}/\text{s}}{0,3049 \text{ kg}/\text{s}}$$

$$\mu_p = 1,65$$

Finalmente se comprueba que el diámetro asumido de 8 pulgadas es adecuado para la tubería en la etapa de presión, ya que el valor de 1,65 lo que indica un flujo de transporte muy diluido entre el gas y el producto.

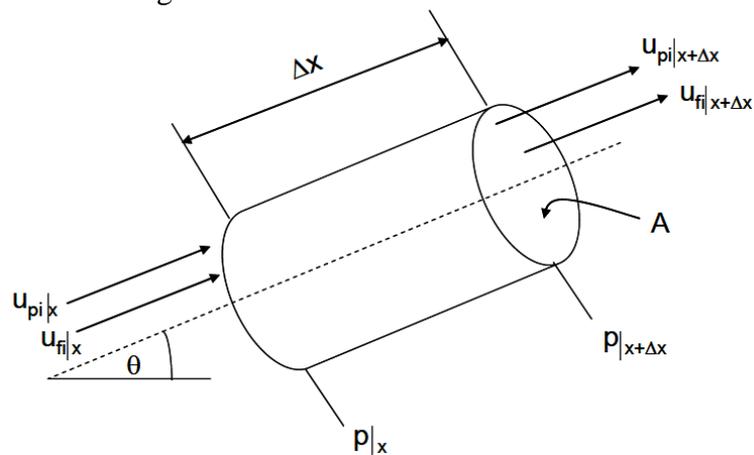
4.3.4 Selección de tubería para la etapa de presión. Para la tubería de descarga igualmente se selecciona del catálogo Acinox (anexo A) la cual es una tubería sin costura, fabricada en acero inoxidable 304.

4.4 Cálculo de pérdidas de energía en la tubería de succión y presión

Las pérdidas de energía en forma de presión se las calcula tanto en los tramos de tubería horizontal y vertical. Los parámetros necesarios para realizar este cálculo son la viscosidad dinámica del fluido, densidad del material a trasportar y otras los cuales al mismo tiempo que se realiza el cálculo se los dará a conocer.

4.4.1 Cálculo de pérdidas de energía en la tubería de succión. Además de los parámetros antes mencionados, para el cálculo de pérdidas de energía es necesario tener en cuenta las longitudes horizontal y vertical del sistema neumático, con esto se procede al cálculo respectivo.

Figura 41. Análisis de tramo de tubería



Fuente: Autor

Se analiza la figura 41 y se procede hacer un de balance de energía mecánica donde se tiene:

$$P1 - P2 = \frac{1}{2} \varepsilon \rho_f u_{fi}^2 + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon) \rho_p u_{pi}^2 + F_{fw}L + F_{pw}L + (1 - \varepsilon)L\rho_p g \sin \theta + \varepsilon L\rho_f g \sin \theta \quad (19)$$

Los parámetros de la ecuación 19 indican las pérdidas de energía por aceleración del gas, aceleración de los sólidos, fricción del gas con la pared, fricción de los sólidos con la pared, energía potencial de los sólidos y energía potencial del gas.

Dónde:

$P1 - P2 = \Delta P$ = Diferencia de presión [Pa]

ε = Porosidad

ρ_f = Densidad del fluido [kg/m³]

u_{fi} = Velocidad intersticial del fluido [m/s]

ρ_p = Densidad de la partícula [kg/m³]

u_{pi} = Velocidad intersticial de la partícula [m/s]

$F_{fw}L$ = Fricción del gas con la pared

$F_{pw}L$ = Fricción de los sólidos con la pared

g = Aceleración de la gravedad [m/s²]

4.4.1.1 *Perdidas de energía en etapa de succión tramo horizontal.* Por ser línea de transporte horizontal los dos últimos términos de la ecuación 19 se hacen cero quedando para el análisis así.

$$P1 - P2 = \frac{1}{2} \varepsilon \rho_f u_{fi}^2 + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon) \rho_p u_{pi}^2 + F_{fw}L + F_{pw}L \quad (20)$$

- Cálculo de la velocidad de sedimentación del gas. Como en la etapa de succión existe tramos horizontales y verticales se calcula velocidad de sedimentación ya que es mayor que la velocidad de ahogo.

$$\frac{\dot{m}_p}{\rho_f * u_{Salt} * A} = \left[\frac{1}{10^{(1440x+1,96)}} \right] \left(\frac{u_{Salt}}{\sqrt{gD}} \right)^{(1100x+2,5)} \quad (21)$$

Dónde:

\dot{m}_p = Flujo másico de material [kg/s]

u_{salt} = Velocidad de saltación [m/s]

A = Área de la sección transversal de tubería de succión [m²]

x = Diámetro de partícula [m]

D = Diámetro de tubería de succión [m]

$$\frac{0,505 \text{ kg/s}}{0,95 \text{ kg/m}^3 * u_{salt} * 18,24 * 10^{-3} \text{ m}^2} = \left[\frac{1}{10^{(1440(0,00173 \text{ m})+1,96)}} \right] \left(\frac{u_{salt}}{\sqrt{9,8 \text{ m/s}^2 * 0,1524 \text{ m}}} \right)^{(1100(0,00173 \text{ m})+2,5)}$$

$$u_{salt} = 14,63 \text{ m/s}$$

Se multiplica por 1,5 para asegura suficiente caudal.

$$u_{salt} = 21,94 \text{ m/s}$$

- Cálculo de la pérdida de energía en etapa de succión tramo horizontal. Se hace uso de la ecuación 20.

Para la ecuación 20 es necesario determinar la velocidad intersticial del fluido y del producto (quinua) y también la fricción del gas con la pared y la fricción del producto con la pared de la tubería.

- Cálculo de la velocidad intersticial del producto. Para determina velocidad intersticial del fluido se usa la ecuación 22.

$$u_{pi} = u_f (1 - 0,0638 x^{0,3} \rho_p^{0,5}) \quad (22)$$

Dónde:

u_f = Velocidad del fluido en succión [kg/s]

$$u_{pi} = 10 \text{ m/s} * (1 - 0,0638 * (0,00173 \text{ m})^{0,3} * (680 \text{ kg/m}^3)^{0,5})$$

$$u_{pi} = 7,53 \text{ m/s}$$

- Cálculo de la velocidad intersticial del fluido. Para este cálculo se procede de la siguiente manera.

$$u_{fi} = \frac{u_f}{\varepsilon} \quad (23)$$

$$u_{fi} = \frac{10 \text{ m/s}}{0,99}$$

$$u_{fi} = 10,1 \text{ m/s}$$

- Cálculo del término FfwL etapa de succión tramo horizontal. Para este cálculo se procede determinando el número de Reynolds.

$$Re_D = \frac{\rho_f * u_f * D}{\mu} \quad (24)$$

$$Re_D = \frac{0,95 \frac{kg}{m^3} * 10 \text{ m/s} * 0,15245 \text{ m}}{1,692 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2}$$

$$Re_D = 85567,37$$

Con el número de Reynolds determinado se calcula el coeficiente de fricción del gas con respecto a la pared.

$$f = 0,184 * Re_D^{-1/5} \quad (25)$$

$$f = 0,184 * (85567,37)^{-1/5}$$

$$f = 0,0184$$

Con los términos anteriores calculados de determina el término FfwL.

$$F_{fw}L = \frac{2 * f * \rho_f * u_f * L}{D} \quad (26)$$

$$F_{fw}L = \frac{2 * 0,0184 * 0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10 \text{ m/s} * 3 \text{ m}}{0,1524 \text{ m}}$$

$$F_{fw}L = 6,88 \text{ Pa}$$

- Cálculo del término $F_{pw}L$ etapa de succión tramo horizontal. Igual que en el término anterior se calcula el número de Reynolds.

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_f(u_{fi}-u_{pi})x}{\mu} \quad (27)$$

$$\text{Re}_D = \frac{0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(10,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 7,53 \text{ m/s} \right) 0,00173 \text{ m}}{1,692 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2}$$

$$\text{Re}_D = 249,63$$

Con el número de Reynolds determinado se calcula el coeficiente de fricción del gas con respecto a la pared sin antes de evaluar el termino C_D .

$$C_D = 18,5 * \text{Re}_p^{-0,6} \quad (28)$$

$$C_D = 18,5 * (249,63)^{-0,6}$$

$$C_D = 0,674$$

Entonces el coeficiente de fricción es:

$$f_p = \frac{3}{8} \frac{\rho_f D}{\rho_p x} C_D \left(\frac{u_{fi}-u_{pi}}{u_{pi}} \right)^2 \quad (29)$$

$$f_p = \frac{3}{8} * \frac{0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} * \frac{0,1524 \text{ m}}{0,00173 \text{ m}} * 0,674 * \left(\frac{10,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 7,53 \text{ m/s}}{7,53 \text{ m/s}} \right)^2$$

$$f_p = 0,00362$$

Con los términos anteriores calculados de determina el término $F_{pw}L$.

$$F_{pw}L = \frac{2 * f_p * (1 - \varepsilon) \rho_p * u_{pi}^2 * L}{D} \quad (30)$$

$$F_{pw}L = \frac{2 * 0,00362 * (1 - 0,99) * 680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (7,53 \text{ m/s})^2 * 3 \text{ m}}{0,1524 \text{ m}}$$

$$F_{pw}L = 55,01 \text{ Pa}$$

Ahora se determina la pérdida de energía en el tramo horizontal de la etapa de succión haciendo uso de la ecuación 20.

$$\Delta P_{\text{Horizon}} = \frac{1}{2} (0,99) (0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (10,1 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + \frac{1}{2} (1 - 0,99) (680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (7,53 \text{ m/s})^2 + 6,88 \text{ Pa} + 55,01 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{\text{tramo horizon}} = 302,64 \text{ Pa}$$

4.4.1.2 *Perdidas de energía en succión tramo vertical.* Por ser línea de transporte vertical los dos últimos términos de la ecuación 19 se multiplican por la unidad debido al seno del ángulo y los dos primeros se desprecian ya que son dominantes mucho más en el tramo horizontal quedando así:

$$\Delta P = F_{fw}L + F_{pw}L + (1 - \varepsilon)L\rho_p g + \varepsilon L\rho_f g \quad (31)$$

- Cálculo del término $F_{fw}L$ en la etapa de succión tramo vertical. Para este cálculo se procede determinando el número de Reynolds.

$$\text{Re}_D = \frac{\rho_f * u_f * D}{\mu} \quad (32)$$

$$\text{Re}_D = \frac{0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10 \text{ m/s} * 0,15245 \text{ m}}{1,692 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2}$$

$$Re_D = 85567,37$$

Con el número de Reynolds determinado se calcula el coeficiente de fricción del gas con respecto a la pared.

$$f = 0,316 * Re_D^{-0,25} \quad (33)$$

$$f = 0,316 * (85567,37)^{-0,25}$$

$$f = 0,0184$$

Con los términos anteriores calculados de determina el término FfwL.

$$F_{fw}L = \frac{2*f*\rho_f*u_f*L}{D} \quad (34)$$

$$F_{fw}L = \frac{2 * 0,0184 * 0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10 \text{ m/s} * 3 \text{ m}}{0,1524 \text{ m}}$$

$$F_{fw}L = 6,88 \text{ Pa}$$

- Cálculo del término FpwL en la etapa de succión tramo vertical. Igual que en el término anterior se calcula el número de Reynolds.

$$Re_p = \frac{\rho_f(u_{fi}-u_{pi})x}{\mu} \quad (35)$$

$$Re_D = \frac{0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(10,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 7,53 \text{ m/s} \right) 0,00173 \text{ m}}{1,692 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2}$$

$$Re_D = 249,63$$

Con el número de Reynolds determinado se calcula el coeficiente de fricción del gas con respecto a la pared sin antes de evaluar el termino CD.

$$C_D = 18,5 * Re_p^{-0,6} \quad (36)$$

$$C_D = 18,5 * (249,63)^{-0,6}$$

$$C_D = 0,674$$

Entonces el coeficiente de fricción es:

$$f_p = \frac{3 \rho_f D}{8 \rho_p x} C_D \left(\frac{u_{fi} - u_{pi}}{u_{pi}} \right)^2 \quad (37)$$

$$f_p = \frac{3}{8} * \frac{0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} * \frac{0,1524 \text{ m}}{0,00173 \text{ m}} * 0,674 * \left(\frac{10,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 7,53 \text{ m/s}}{7,53 \text{ m/s}} \right)^2$$

$$f_p = 0,00362$$

Determinamos el de G para evaluar los términos $F_{pw}L$.

$$G = \frac{\dot{m}_p}{A} \quad (38)$$

Dónde:

u_f = Velocidad del fluido en succión [kg/s]

$$G = \frac{0,505 \text{ kg/s}}{18,24 * 10^{-3} \text{ m}^2}$$

$$G = 27,68 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Con los términos anteriores calculados se determina el término $F_{pw}L$.

$$F_{pw}L = 0,057 * G * L * \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (39)$$

$$F_{pw}L = 0,057 * 27,68 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} * 3 \text{ m} * \sqrt{\frac{9,8 \text{ m/s}^2}{0,1524 \text{ m}}}$$

$$F_{pw}L = 37,95 Pa$$

Ahora se determina la pérdida de energía en el tramo vertical de la etapa de succión, se hace uso de la ecuación 31.

$$\Delta P_{verti} = 6,88 Pa + 37,95 Pa + (1 - 0,99) * 3 m * 680 \frac{kg}{m^3} * 9,8 \frac{m}{s^2} + 0,99 * 3 m * 0,95 \frac{kg}{m^3} * 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$\Delta P_{tramo verti} = 272 Pa$$

Finalmente se puede determinar que las pérdidas de energía totales en la etapa de succión es:

$$\Delta P_{etapa succión} = \Delta P_{tramo horizon} + \Delta P_{tramo verti}$$

$$\Delta P_{etapa succión} = 272 Pa + 302,64 Pa$$

$$\Delta P_{etapa succión} = 574,64 Pa$$

4.4.2 *Cálculo de pérdidas de energía en la tubería de presión.* Así como en la etapa de succión se determina las pérdidas de energía tanto en el tramo horizontal vertical de la etapa de presión. Para realizar este proceso se igualmente se utiliza la ecuación 19 analizada de la figura 41.

$$P1 - P2 = \frac{1}{2} \varepsilon \rho_f u_{fi}^2 + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon) \rho_p u_{pi}^2 + F_{fw}L + F_{pw}L + (1 - \varepsilon) L \rho_p g \sin \theta + \varepsilon L \rho_f g \sin \theta$$

4.4.2.1 *Perdidas de energía en etapa de presión tramo horizontal.* Por ser línea de transporte horizontal los dos últimos términos de la ecuación 19 se hacen cero quedando para el análisis así.

$$P1 - P2 = \frac{1}{2} \varepsilon \rho_f u_{fi}^2 + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon) \rho_p u_{pi}^2 + F_{fw}L + F_{pw}L$$

- Cálculo de la velocidad de sedimentación del gas. Se calcula ya que es mayor que la velocidad de ahogo, para este cálculo se utiliza la ecuación 21.

$$\frac{\dot{m}_p}{\rho_f * u_{Salt} * A} = \left[\frac{1}{10^{(1440x+1,96)}} \right] \left(\frac{u_{Salt}}{\sqrt{gD}} \right)^{(1100x+2,5)}$$

$$\frac{0,505 \text{ kg/s}}{0,95 \text{ kg/m}^3 * u_{Salt} * 0,0324 \text{ m}^2} = \left[\frac{1}{10^{(1440(0,00173 \text{ m})+1,96)}} \right] \left(\frac{u_{Salt}}{\sqrt{9,8 \text{ m/s}^2 * 0,2032 \text{ m}}} \right)^{(1100(0,00173 \text{ m})+2,5)}$$

$$u_{Salt} = 14,50 \text{ m/s}$$

Con el valor anterior se puede predecir que la velocidad es muy similar que en la etapa de succión. Se multiplica por 1,5 para asegura suficiente caudal.

$$u_{Salt} = 21,7 \text{ m/s}$$

- Cálculo de la velocidad intersticial del producto. Para determina velocidad intersticial del fluido se usa la ecuación 22.

$$u_{pi} = u_f (1 - 0,0638x^{0,3} \rho_p^{0,5})$$

$$u_{pi} = 10 \text{ m/s} * (1 - 0,0638 * (0,00173 \text{ m})^{0,3} * (680 \text{ kg/m}^3)^{0,5})$$

$$u_{pi} = 7,53 \text{ m/s}$$

- Cálculo de la velocidad intersticial del fluido. Para este cálculo se utiliza la ecuación 23.

$$u_{fi} = \frac{u_f}{\varepsilon}$$

$$u_{fi} = \frac{10 \text{ m/s}}{0,99}$$

$$u_{fi} = 10,1 \text{ m/s}$$

- Cálculo del término FfwL en etapa de presión tramo horizontal. Para este cálculo se procede determinando el número de Reynolds.

$$Re_D = \frac{\rho_f * u_f * D}{\mu} \quad (40)$$

$$Re_D = \frac{0,95 \frac{kg}{m^3} * 10 \text{ m/s} * 0,2032 \text{ m}}{1,692 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2}$$

$$Re_D = 114089,83$$

Con el número de Reynolds determinado se calcula el coeficiente de fricción del gas con respecto a la pared.

$$f = 0,184 * Re_D^{-1/5} \quad (41)$$

$$f = 0,184 * (114089,83)^{-1/5}$$

$$f = 0,017$$

Con los términos anteriores calculados se determina el término $F_{fw}L$ en la etapa de presión tramo horizontal.

$$F_{fw}L = \frac{2 * f * \rho_f * u_f * L}{D} \quad (42)$$

$$F_{fw}L = \frac{2 * 0,017 * 0,95 \frac{kg}{m^3} * 10 \text{ m/s} * 3 \text{ m}}{0,2032 \text{ m}}$$

$$F_{fw}L = 4,76 \text{ Pa}$$

- Cálculo del término $F_{pw}L$ etapa de presión tramo horizontal. Igual que en el término anterior se calcula el número de Reynolds.

$$Re_P = \frac{\rho_f (u_{fi} - u_{pi}) x}{\mu} \quad (43)$$

$$Re_D = \frac{0,95 \frac{kg}{m^3} \left(10,1 \frac{m}{s} - 7,53 \text{ m/s} \right) 0,00173 \text{ m}}{1,692 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2}$$

$$Re_D = 249,63$$

Con el número de Reynolds determinado se calcula el coeficiente de fricción del gas con respecto a la pared sin antes de evaluar el termino CD.

$$C_D = 18,5 * Re_p^{-0,6} \quad (44)$$

$$C_D = 18,5 * (249,63)^{-0,6}$$

$$C_D = 0,674$$

Entonces el coeficiente de fricción es:

$$f_p = \frac{3}{8} \frac{\rho_f D}{\rho_p x} C_D \left(\frac{u_{fi} - u_{pi}}{u_{pi}} \right)^2 \quad (45)$$

$$f_p = \frac{3}{8} * \frac{0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} * \frac{0,2032 \text{ m}}{0,00173 \text{ m}} * 0,674 * \left(\frac{10,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 7,53 \text{ m/s}}{7,53 \text{ m/s}} \right)^2$$

$$f_p = 0,00483$$

Con los términos anteriores calculados de determina el término $F_{pw}L$ de la etapa de presión tramo horizontal del sistema neumático.

$$F_{pw}L = \frac{2 * f_p * (1 - \varepsilon) \rho_p * u_{pi}^2 * L}{D} \quad (46)$$

$$F_{pw}L = \frac{2 * 0,00483 * (1 - 0,99) * 680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (7,53 \text{ m/s})^2 * 3 \text{ m}}{0,2032 \text{ m}}$$

$$F_{pw}L = 54,98 \text{ Pa}$$

Ahora se determina la perdida de energía en el tramo horizontal de la etapa de presión haciendo uso de la ecuación 19.

$$P1 - P2 = \frac{1}{2} \varepsilon \rho_f u_{fi}^2 + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon) \rho_p u_{pi}^2 + F_{fw}L + F_{pw}L$$

$$\Delta P_{Horizon} = \frac{1}{2} (0,99) (0,95 \frac{kg}{m^3}) (10,1 \frac{m}{s})^2 + \frac{1}{2} (1 - 0,99) (680 \frac{kg}{m^3}) (7,53 \frac{m}{s})^2 + 4,76 Pa + 54,98 Pa$$

$$\Delta P_{tramo horizon} = 300,49 Pa$$

4.4.2.2 *Perdidas de energía en la etapa de presión tramo vertical.* Por ser línea de transporte vertical los dos últimos términos de la ecuación 19 se multiplican por la unidad debido al seno del ángulo y los dos primeros se desprecian ya que son dominantes mucho más en el tramo horizontal quedando así igualmente como en el caso de la etapa de succión tramo vertical.

$$\Delta P = F_{fw}L + F_{pw}L + (1 - \varepsilon)L\rho_p g + \varepsilon L\rho_f g \quad (47)$$

- Cálculo del término $F_{fw}L$ en etapa de presión tramo vertical. Para este cálculo se procede determinando el número de Reynolds.

$$Re_D = \frac{\rho_f u_f D}{\mu} \quad (48)$$

$$Re_D = \frac{0,95 \frac{kg}{m^3} * 10 \frac{m}{s} * 0,2032 m}{1,692 \times 10^{-5} N \cdot s/m^2}$$

$$Re_D = 114089,83$$

Con el número de Reynolds determinado se calcula el coeficiente de fricción del gas con respecto a la pared.

$$f = 0,184 * Re_D^{-1/5} \quad (49)$$

$$f = 0,184 * (114089,83)^{-1/5}$$

$$f = 0,017$$

Con los términos anteriores calculados de determina el término $F_{fw}L$.

$$F_{fw}L = \frac{2 * f * \rho_f * u_f * L}{D} \quad (50)$$

$$F_{fw}L = \frac{2 * 0,017 * 0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10 \text{ m/s} * 3 \text{ m}}{0,2032 \text{ m}}$$

$$F_{fw}L = 4,76 \text{ Pa}$$

- Cálculo del término $F_{pw}L$ etapa de presión tramo vertical. Igual que en el término anterior se calcula el número de Reynolds.

$$\text{Re}_D = \frac{\rho_f (u_{fi} - u_{pi}) x}{\mu} \quad (51)$$

$$\text{Re}_D = \frac{0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (10,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 7,53 \text{ m/s}) 0,00173 \text{ m}}{1,692 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2}$$

$$\text{Re}_D = 249,63$$

Con el número de Reynolds determinado se calcula el coeficiente de fricción del gas con respecto a la pared sin antes de evaluar el termino CD.

$$C_D = 18,5 * \text{Re}_D^{-0,6} \quad (52)$$

$$C_D = 18,5 * (249,63)^{-0,6}$$

$$C_D = 0,674$$

Entonces el coeficiente de fricción es:

$$f_p = \frac{3}{8} \frac{\rho_f D}{\rho_p x} C_D \left(\frac{u_{fi} - u_{pi}}{u_{pi}} \right)^2 \quad (53)$$

$$f_p = \frac{3}{8} * \frac{0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} * \frac{0,2032 \text{ m}}{0,00173 \text{ m}} * 0,674 * \left(\frac{10,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 7,53 \text{ m/s}}{7,53 \text{ m/s}} \right)^2$$

$$f_p = 0,00483$$

Determinamos el valor de G para evaluar los términos $F_{pw}L$.

$$G = \frac{\dot{m}_p}{A} \quad (54)$$

Dónde:

\dot{m}_p = Flujo másico del producto [kg/s]

$$G = \frac{0,505 \text{ kg/s}}{0,0324 \text{ m}^2}$$

$$G = 15,58 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Con los términos anteriores calculados se determina el término $F_{pw}L$.

$$F_{pw}L = 0,057 * G * L * \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (55)$$

$$F_{pw}L = 0,057 * 15,58 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} * 3 \text{ m} * \sqrt{\frac{9,8 \text{ m/s}^2}{0,2032 \text{ m}}}$$

$$F_{pw}L = 18,5 \text{ Pa}$$

Ahora se determina la pérdida de energía en el tramo vertical de la etapa de presión para ello se hace uso de la ecuación 19.

$$\Delta P = F_{fw}L + F_{pw}L + (1 - \varepsilon)L\rho_p g + \varepsilon L\rho_f g$$

$$\Delta P_{\text{verti}} = 4,76 \text{ Pa} + 18,5 \text{ Pa} + (1 - 0,99) * 3 \text{ m} * 680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 0,99 * 3 \text{ m} * 0,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\Delta P_{\text{tramo verti}} = 250,83 \text{ Pa}$$

Finalmente se puede determinar que la pérdida de energía total en la etapa de presión es:

$$\Delta P_{\text{etapa presión}} = \Delta P_{\text{tramo horizon}} + \Delta P_{\text{tramo verti}}$$

$$\Delta P_{\text{etapa presión}} = 300,49 \text{ Pa} + 250,83 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{\text{etapa presión}} = 551,32 \text{ Pa}$$

4.5 Cálculo de pérdidas de energía en los accesorios del sistema neumático

Las pérdidas que existen especialmente en el sistema son por cambio de dirección, reducción de área, desvíos de camino y otras, todas provocadas por los accesorios que cuenta el sistema de transporte neumático para la quinua.

$$\Delta P_{\text{codos}} = \frac{2 * 7,5 * \Delta P_{\text{tramo verti}}}{L} \quad (56)$$

$$\Delta P_{\text{codos}} = \frac{2 * 7,5 * 250,83 \text{ Pa}}{3 \text{ m}}$$

$$\Delta P_{\text{codos}} = 3762,45 \text{ Pa}$$

4.6 Cálculo de pérdidas de energía totales del sistema neumático

Definidos todos los valores de pérdidas de energía tanto en la etapa de succión como en la etapa de presión se proceden a determinar las pérdidas de energía totales en el sistema.

$$\Delta P_{\text{totales del sistema}} = \Delta P_{\text{etapa succión}} + \Delta P_{\text{etapa presión}} + \Delta P_{\text{codos}} \quad (57)$$

$$\Delta P_{\text{totales del sistema}} = 574,64 \text{ Pa} + 551,32 \text{ Pa} + 3762,45 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{\text{totales del sistema}} = 4888,41 \text{ Pa}$$

4.7 Cálculo de la potencia requerida para el sistema de transporte

Para determinar la potencia requerida en el sistema se es necesario tener las pérdidas de energía determinadas anteriormente y así con esto definir la cantidad de potencia para que el sistema funcione correctamente.

4.7.1 Caudal de aire. El caudal de aire es indispensable conocer para que con este valor se pueda determinar la potencia necesaria que el flujo de aire y material requiere para su transporte en fase diluida y así conocer la potencia necesaria para lograr este trabajo.

$$Q = A * v \quad (58)$$

Para determinar el caudal hacemos uso del área de succión y velocidad de sedimentación con el fin de garantizar suficiente caudal.

$$Q = 0,01824 \text{ m}^2 * 21,94 \text{ m/s}$$

$$Q = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.7.2 Potencia perdida en el sistema. La potencia perdida en el sistema se calcula con la energía perdida anteriormente calculada y el caudal.

$$Pot \text{ perdida} = \Delta P_{\text{totales del sistema}} * Q \quad (59)$$

$$Pot \text{ perdida} = 4888,41 \text{ Pa} * 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Pot \text{ perdida} = 1955,36 \text{ W}$$

4.7.3 Presión requerida para transporte de gas y quinua. Determinamos la presión necesaria para que el sistema logre su propósito de transportar el flujo de gas y quinua.

$$P = \frac{F}{A} \quad (60)$$

Dónde:

P = Presión requería [Pa]

F = Fuerza requería para mover gas y quinua [Pa]

Como la fuerza es igual a la masa por la gravedad se tiene:

$$P = \frac{m \cdot g}{A} \quad (61)$$

Pero la masa es igual a la densidad por el volumen la ecuación 30 vuelve cambiar.

$$P = \frac{\rho_{com} \cdot V \cdot g}{A} \quad (62)$$

Dónde:

V = Volumen [Pa]

ρ_{com} = densidad de quinua y gas [Pa]

Como el volumen es igual al área por longitud.

$$P = \frac{\rho_{com} \cdot A \cdot L \cdot g}{A} \quad (63)$$

Entonces la ecuación 63 queda así.

$$P = \rho_{com} \cdot L \cdot g \quad (64)$$

$$P = (980 + 0,95) \frac{kg}{m^3} \cdot 3 m \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$P = 28839,93 \frac{N}{m^2}$$

4.7.4 *Potencia requerida para mover quinua y gas.* Con la presión requería y el caudal se calcula la potencia que se requiere para mover quinua y aire.

$$Pot req = P * Q \quad (65)$$

$$Pot req = 28839,93 \frac{N}{m^2} * 0,4 m^3/s$$

$$Pot req = 11535,97 W$$

4.7.5 *Potencia requerida del sistema.* La potencia del sistema se calcula con las de energía que se pierde en el sistema y la potencia que se requiere para mover el flujo de aire y quinua.

$$Pot req sistema = Pot req + Pot perdida \quad (66)$$

$$Pot req sistema = 11535,97 W + 1955,36 W$$

$$Pot req sistema = 13491,33 W$$

4.8 Selección del ventilador

Del catálogo de CASALS se selecciona un ventilador centrífugo de media presión y de simple aspiración con motor incorporado, entonces con la potencia del sistema determinada y el caudal de aire que el ventilador que debe proporcionar para el transporte del producto se selecciona un ventilador de 15000 W y el cual proporciona un caudal de aire de hasta de 2 m³/s y gira a 2925 rpm máximo. Ver anexo D.

CAPÍTULO V

5. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE TRANSPORTE DE QUINUA UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS

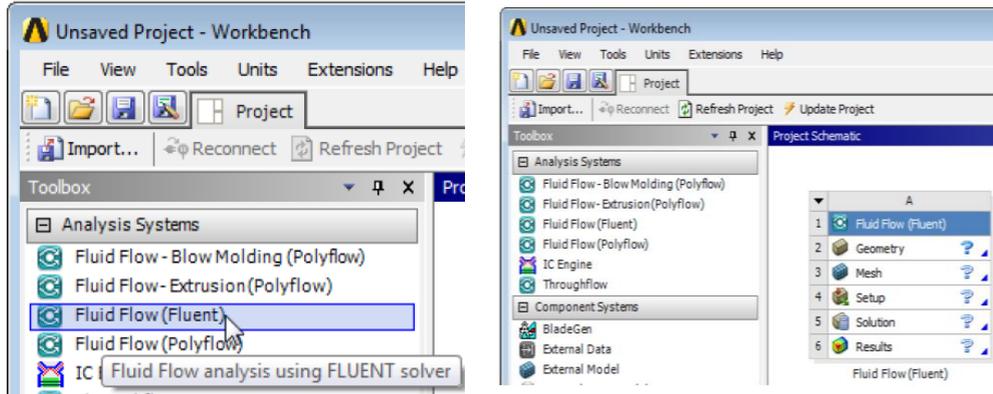
En este acápite se llevará a cabo paso a paso la simulación del comportamiento del sistema diseñado en el capítulo anterior, para ello la simulación dinámica del proceso de transporte de quinua y aire se va a realizar usando el módulo Fluid Flow (Fluent) del software ANSYS Workbench, en el cual se debe realizar las siguientes actividades:

- Iniciar ANSYS Workbench.
- Crear un sistema de análisis de flujo de fluidos en el módulo fluid flow (fluent) en ANSYS Workbench.
- Crear la geometría del equipo donde se va analizar el flujo de aire y granos de quinua con ANSYS DesignModeler o a la vez importarlos desde otro software CAD como SolidWorks.
- Crear la malla computacional para la geometría realizada en ANSYS Workbench o importada de un software CAD, para esto se usa ANSYS Meshing.
- Configurar la simulación CFD en ANSYS Fluent, para esto es necesario que se cumplan con las siguientes actividades:
 - Definir las propiedades del material y las condiciones de contorno del proceso de flujo de granos y aire.
 - Actualizar la malla para iniciar el cálculo
 - Iniciar el cálculo con trazado residual.
 - Calcule una solución utilizando el solucionador basado en presión.
 - Examine visualmente los campos de flujo
- Finalmente ejecutar la solución y verificar los resultados obtenidos como gráficas, colares del proceso, presión, velocidad, resuspensión entre otros.

5.1 Creación del módulo Fluid flow (Fluent) en ANSYS Workbench

El primer paso para la simulación del sistema de transporte neumático es crear el módulo Fluid Flow en ANSYS Workbench en el cual se procederá a trabajar para obtener los resultados y simulación requerida.

Figura 42. Módulo Fluid flow (fluent)



Fuente: ANSYS Workbench

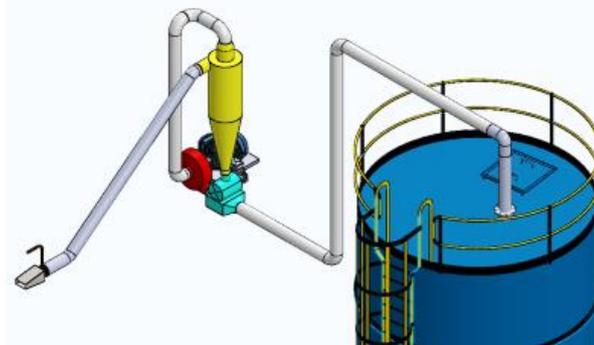
Como el análisis del sistema de transporte se va a realizar dos fases se inducirá otro módulo fluid flow (fluent) los cuales estarán enlazados entre sí.

5.2 Geometría del equipo

La geometría del equipo donde va a ser analizado consta de dos tramos, la etapa de succión la cual es la carga de producto al ciclón y la etapa de presión la cual consta de la tubería que lleva al almacenamiento del producto al silo.

La geometría del equipo se desarrolló en su totalidad en el software SolidWorks y se importó al software ANSYS para el análisis del proceso de transporte neumático.

Figura 43. Geometría del equipo en SolidWorks



Fuente: Autor

Con la geometría realizada se procede a la importación de la misma al software ANSYS.

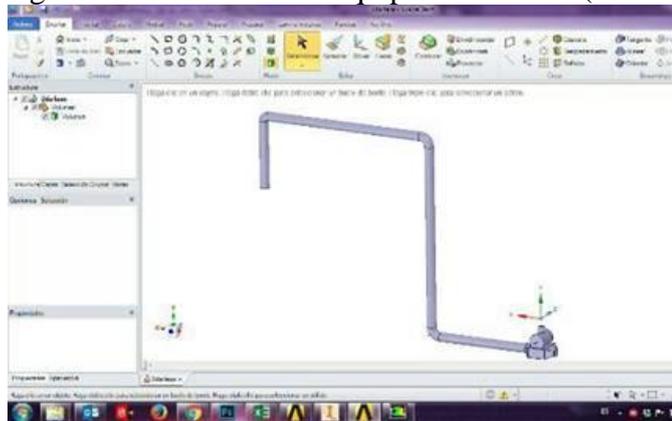
Figura 44. Geometría del equipo en ANSYS (Fase 1)



Fuente: Autor

Igualmente se muestra en la figura 45 la geometría de la fase 2 en ANSYS.

Figura 45. Geometría del equipo en ANSYS (Fase 2)

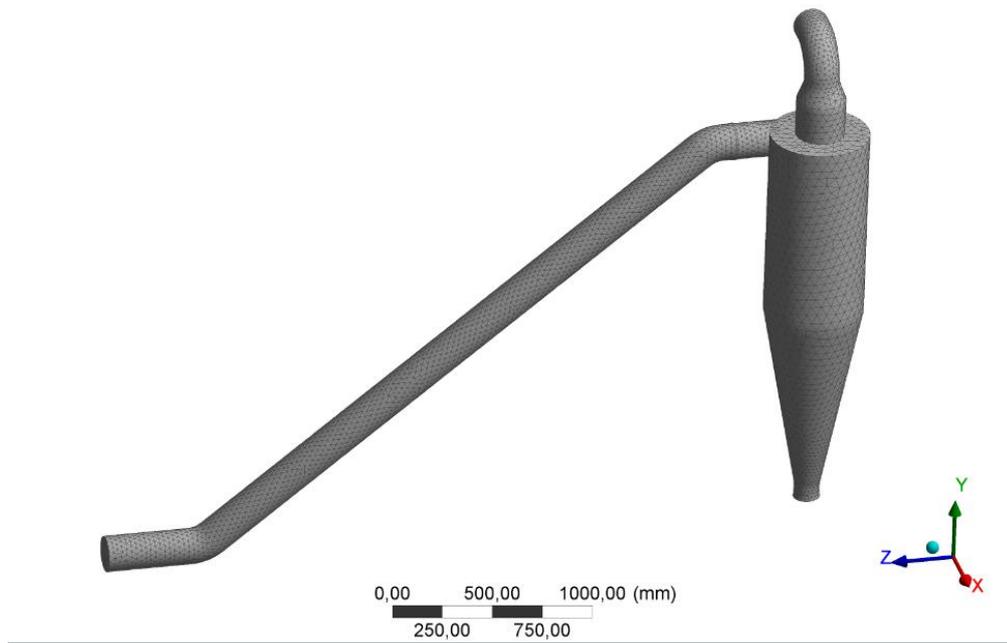


Fuente: Autor

5.3 Malla computacional para la geometría

Para que el cálculo por parte del software ANSYS Workbench en el módulo Fluid Flow (Fluent) sea de una mejor manera se configura una malla adecuada de tamaño mínimo de 10 mm, igualmente el elemento de análisis va a ser tetraédrico, el tamaño del elemento es de 50 mm, el número de nodos es 24168, el número de elementos es 64483, los modelos de análisis son Viscous - RNG k-e – Standard Wall Fn – Discrete Phase además en la convergencia el método utilizado es Skewness y el valor es de 0,22569.

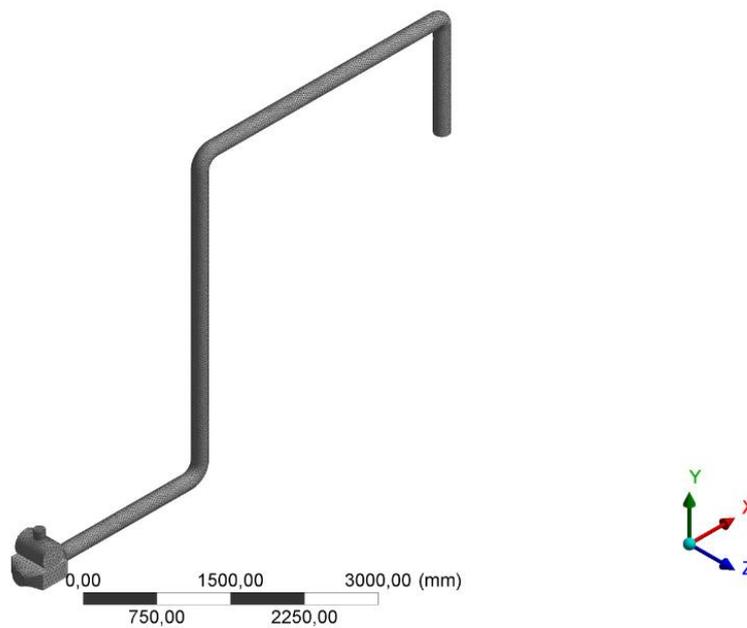
Figura 46. Malla de la geometría (Fase1)



Fuente: Autor

En la figura 47 se puede visualizar la malla de la geometría de la fase 2

Figura 47. Malla de la geometría (Fase1)



Fuente: Autor

Con la malla definida en la figura 48 se muestra los datos de las mismas tanto de la fase 1 y 2.

Figura 48. Datos de la malla (Fase 1)

Details of "Mesh"	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Assembly Meshing	
Patch Conforming Options	
Patch Independent Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	24168
Elements	111360
Mesh Metric	Skewness
Min	3,1002e-006
Max	0,84575
Average	0,22373
Standard Devi...	0,11947

Fuente: Autor

Los datos de la malla de la fase 2 se muestra en la figura 49.

Figura 49. Datos de la malla (Fase 2)

Details of "Mesh"	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Assembly Meshing	
Patch Conforming Options	
Patch Independent Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	13978
Elements	64483
Mesh Metric	Skewness
Min	5,0581e-005
Max	0,93348
Average	0,22569
Standard Devi...	0,12125

Fuente: Autor

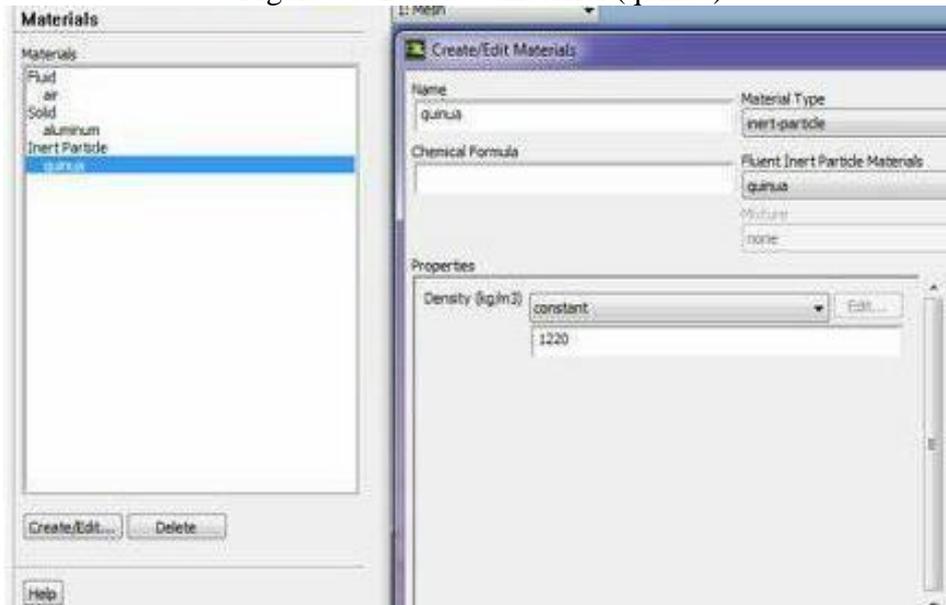
5.4 Configuración para la simulación

Para la simulación del proceso hay que introducir en el software todos los datos necesarios que ayuden a definir correctamente las condiciones de contorno del sistema de transporte

neumático de granos de quinua y aire, además propiedades importantes como velocidad, densidad, tamaño del producto y otras propiedades físicas de materiales lo etc.

En la figura 51 se muestra los datos que se introducen como volumen y velocidad del flujo, material, etc.

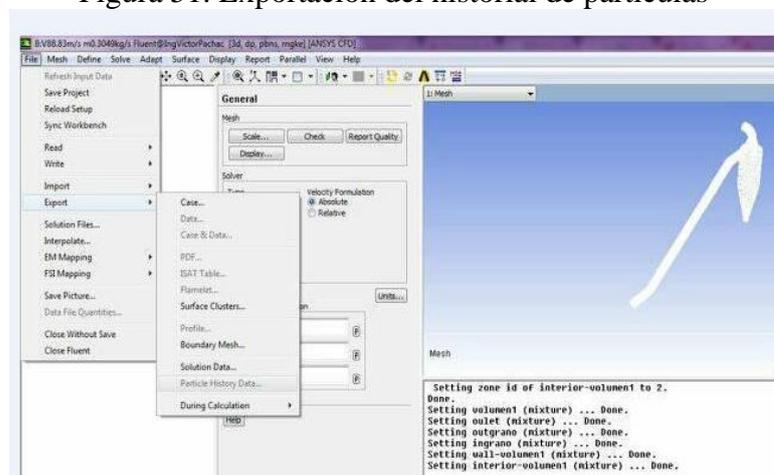
Figura 50. Datos de material (quinua)



Fuente: Autor

Después de definir todas las condiciones de contorno, así como propiedades del flujo de granos y aire se procede con la exportación del historial de partículas al post procesador, así como la importación para finalmente ejecutar el proceso y obtener los resultados.

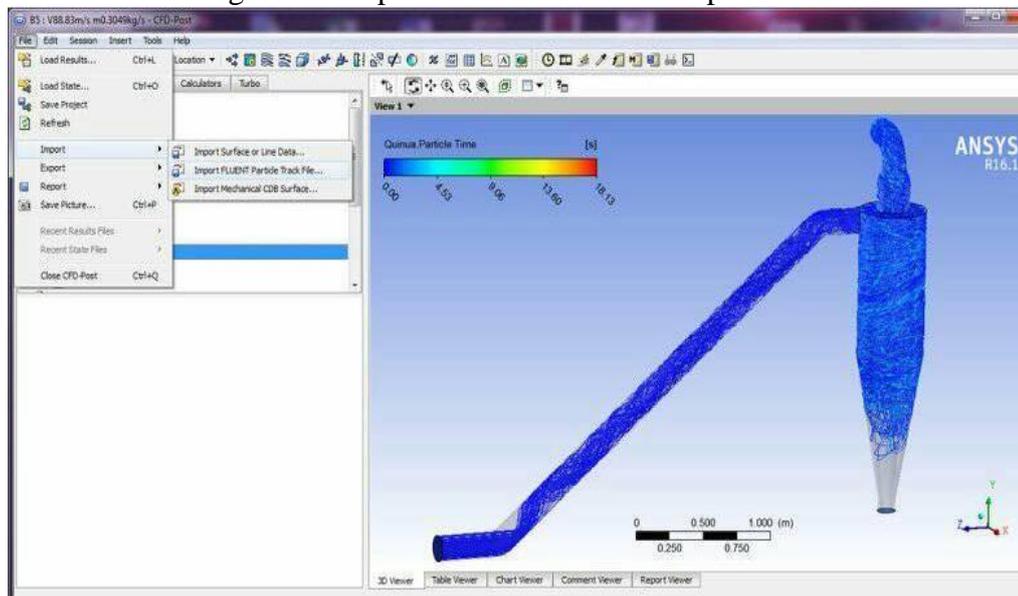
Figura 51. Exportación del historial de partículas



Fuente: Autor

Igualmente se realiza importación del historial de partículas.

Figura 52. Importación del historial de partículas



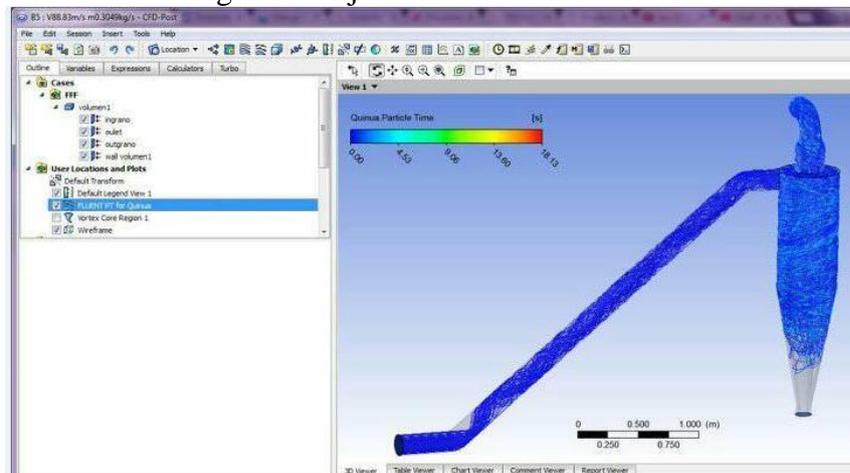
Fuente: Autor

5.5 Ejecución de la simulación

Definida ya todas condiciones de contorno, así como anteriormente la geometría y la malla computacional se procede con la ejecución de la simulación del sistema de transporte neumático.

En la figura 53 se presenta el desarrollo de la ejecución de la simulación del sistema de transporte neumático.

Figura 53. Ejecución de la simulación



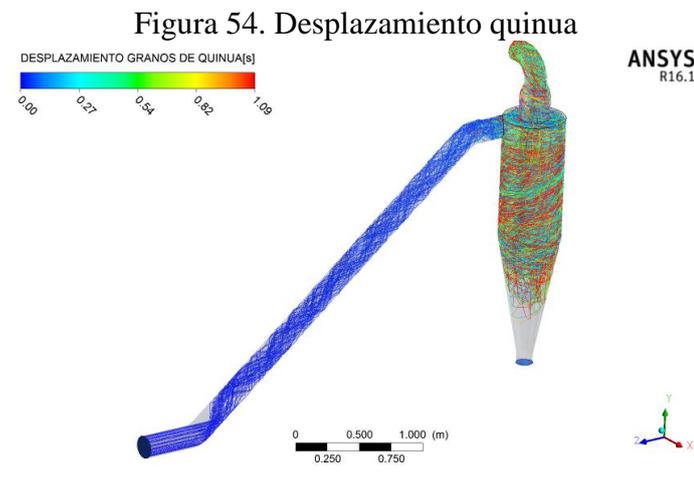
Fuente: Autor

5.6 Resultados de la simulación

Los resultados que se obtienen de la simulación como en el inicio de este capítulo se resaltó son en el tramo de la succión del producto que va desde el recipiente contenedor hacia el ciclón y en el tramo de presión que desde la salida del ciclón pasando por la tubería de presión hasta llegar al silo de almacenamiento.

5.6.1 *Resultados en la etapa succión.* En la figura 51 se muestra los resultados del comportamiento en la etapa de succión del producto hacia el ciclón.

Los resultados que se presentan son de desplazamiento, la presión, velocidad y existencia de remolino.

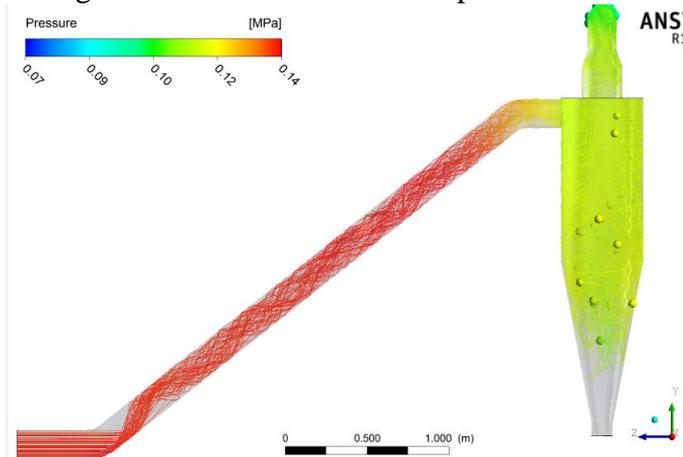


Fuente: Autor

En este gráfico se puede apreciar el tiempo que se demora un grano de quinua en realizar el desplazamiento por la trayectoria que le otorga el fenómeno en la etapa de succión.

En la figura 55 presenta la presión dinámica que existe en el tramo de succión.

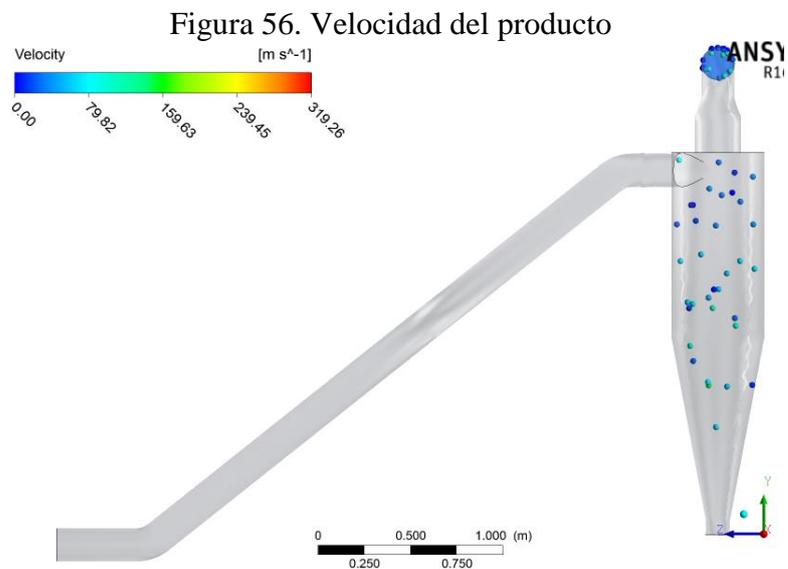
Figura 55. Presión dinámica etapa de succión.



Fuente: Autor

La presión dinámica encontrada en la simulación es aproximada a la calculada, siendo aceptada como solución.

La velocidad en la etapa de succión se muestra en la figura 56.

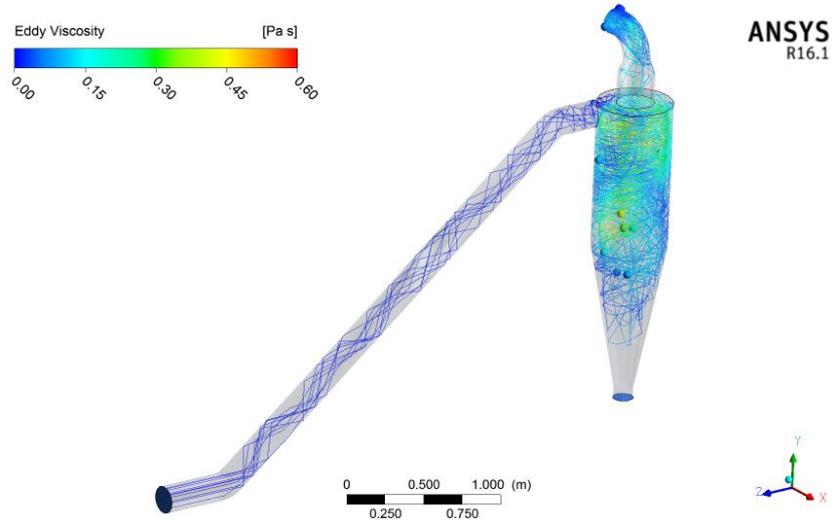


Fuente: Autor

La velocidad del Producto es muy aproximada a la velocidad de cálculo en saltación y choking, garantizando la fluidización de las partículas

Las líneas de remolino existente en la etapa de succión se visualizan en la figura 57.

Figura 57. Remolino en la succión

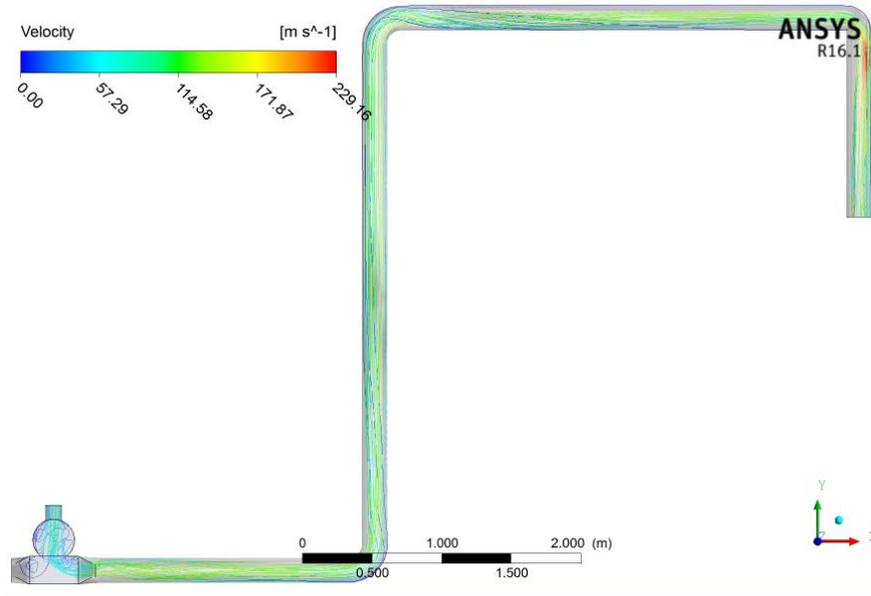


Fuente: Autor

5.6.2 *Resultados en la etapa de presión.* El comportamiento del transporte de quinua por la etapa de presión se muestra en la figura 58.

Igualmente, como en la primera fase se analiza presión, velocidad, remolino, desplazamiento, etc.

Figura 58. Velocidad del producto

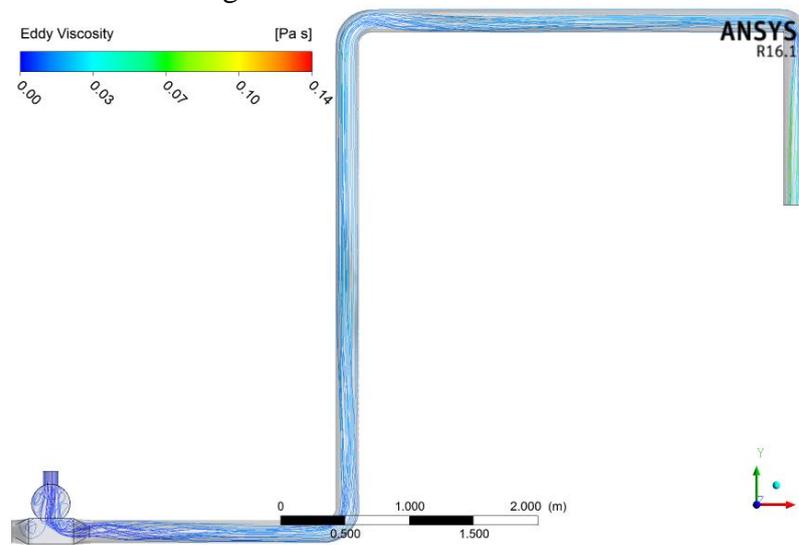


Fuente: Autor

La simulación indica una velocidad de descarga, con magnitud muy cercana a la calculada, pudiéndose observar secciones en donde se incrementa por cambios de dirección la velocidad, fenómeno que a través del cálculo es imposible determinar.

Las líneas de remolino en esta fase se muestran en la figura 59.

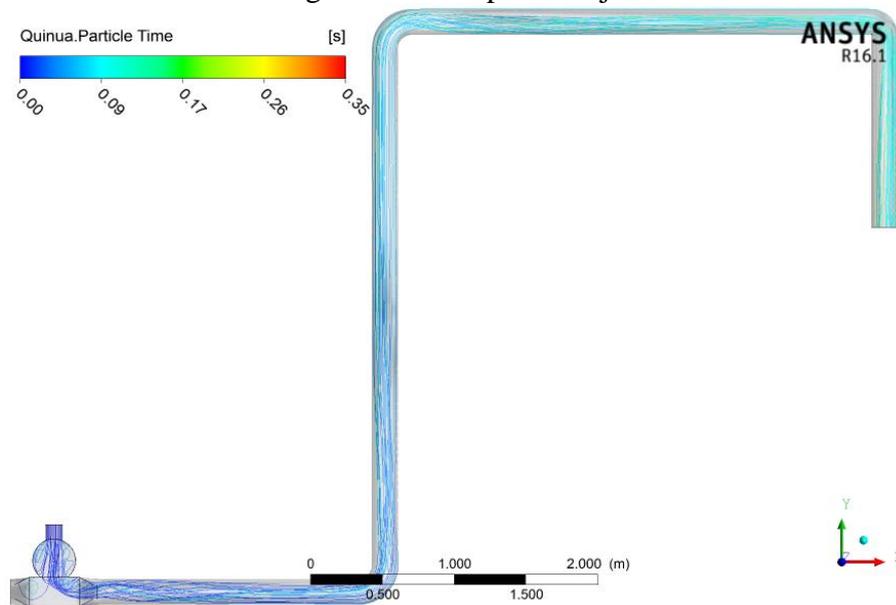
Figura 59. Remolino en la fase 2



Fuente: Autor

El tiempo de flujo en esta etapa se visualiza en la siguiente figura.

Figura 60. Tiempo de flujo



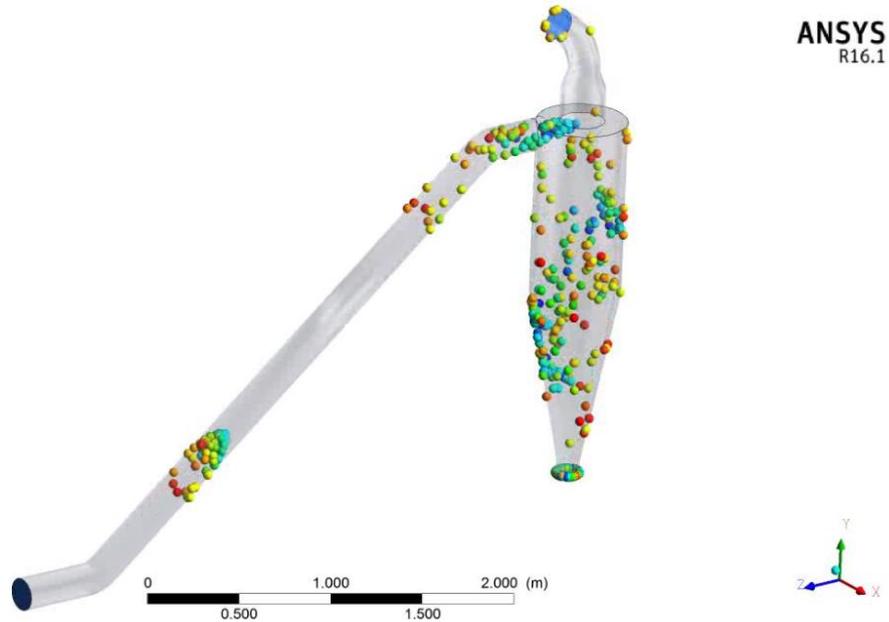
Fuente: Autor

El almacenamiento del producto se muestra a continuación

5.7 Visualización en realidad aumentada

El transporte del grano se lo puede visualizar a continuación tanto en la etapa de succión y presión, considerando que se aumentó el tamaño del grano con fines de que se pueda observar, sin alterar las propiedades físicas del mismo ni los valores de frontera estimados.

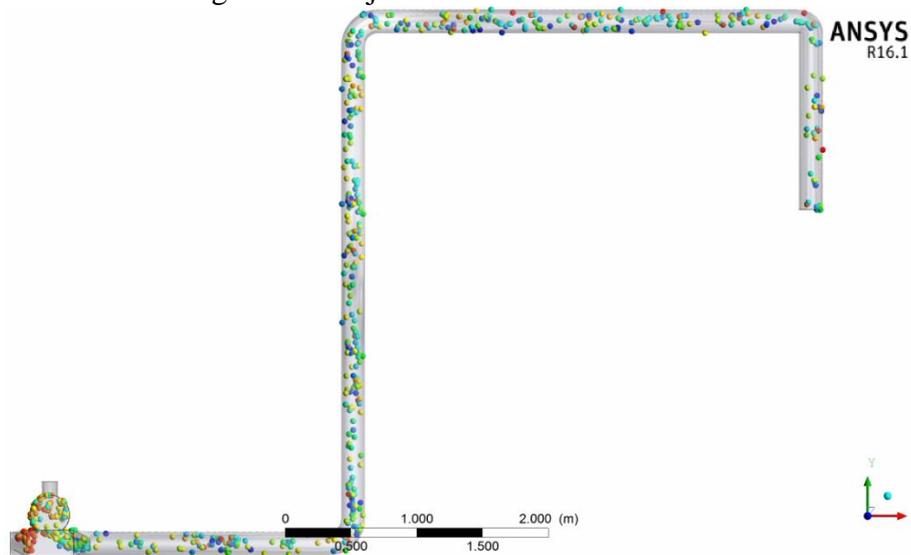
Figura 61. Transporte en etapa succión



Fuente: Autor

El flujo de almacenamiento en la etapa se presión muestra en la figura 62.

Figura 62. Flujo de almacenamiento fase 2



Fuente: Autor

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Realizando el análisis de alternativas, se concluye que el sistema de transporte neumático mixto de dos etapas, es adecuado para el transporte del grano de quinua ya que permite la absorción desde lugares apilados y la impulsión del mismo hacia un lugar de almacenamiento, obteniendo ahorro de mano de obra, optimización de tiempo de producción, aislamiento del producto de la mano humana garantizando la inocuidad del producto, y repercutiendo de manera positiva en la salud del operario.

La carga estática del sistema es bastante elevada, debido a que el ventilador tiene la función de arrastrar la masa de quinua, e impulsarla a la vez, adicionalmente se suma las pérdidas del sistema.

El caudal de aire del ventilador seleccionado va por encima del calculado, ya que es el que mejor se asemeja a las condiciones de cálculo, por lo tanto, la velocidad de transporte se ve ligeramente alterada.

De acuerdo a normas sanitarias para el manejo de alimentos, la máquina debe ser construida en acero inoxidable en su totalidad, esto para garantizar la inocuidad del producto.

En la construcción del sistema de transporte neumático, es necesario que en la conformación de la geometría se use soldadura Tig, la cual debido a que la presencia del gas inerte Argón, protege el cordón del aire circundante, además puede adoptar todas las posiciones de soldado, y no genera escoria, siendo apta para el empalme de elementos de poco espesor.

Con la simulación realizada en el software ANSYS, se puede concluir que el sistema cumple con las condiciones de diseño, ya que el nivel de fluidización es elevado,

cumpliendo con la capacidad de transporte preestablecido, no presentando inconvenientes y cumpliendo con los objetivos planteados inicialmente.

6.2 Recomendaciones

En equinas donde se cambie de dirección de horizontal a vertical el sentido del transporte, se recomienda reemplazar los codos que poseen curvatura por una unión en T, para que así se forme un colchón de granos mismos y estos ayuden a minimizar el desgaste en estos puntos críticos.

Es necesario realizar un análisis de desgaste en el sistema ya que la fricción entre los granos y la pared interna tanto de tubería como del ciclón mismo, es alto en el proceso de transporte Neumático.

Se recomienda colocar ciclones de descarga al final de la línea de presión, para disminuir la velocidad del grano al momento de entrar al silo de almacenamiento

Se recomienda la implementación de una boquilla en la tubería de succión del material, para que la recolección de la materia prima sea más uniforme.

Se recomienda hermetizar de la manera más adecuada las uniones de tuberías, uniones de equipos, para evitar fuga de presión de aire, que repercuten en un sistema eficiente.

La válvula rotativa dosificadora debe ser seleccionada con mucha cautela, ya que debe ser de construcción hermética, porque es muy importante que no haya filtración ascendente de aire al ciclón, de ser así crearía una caída de presión en la línea primaria de succión, adicional es causa de resuspensión en el asiento del ciclón, lo cual repercute en reflujos de grano por la línea de aspiración directa a la turbina del ventilador, causando pérdidas en el sistema y daños al equipo.

El software ANSYS en simulación de partículas granulares desprecia las fuerzas cohesivas de interacción entre granos, Por lo que se recomienda la utilización de otro paquete informático que tenga como función principal el análisis de material particulado.

BIBLIOGRAFÍA

AVNER, Sydney. *Introducción a la metalurgia física*. segunda. México : McGRAW-HILL, 1988.

CERVILLA, N. *Propiedades físicas de semillas y análisis proximal de harinas de chenopodium quinoa willd cosechadas en distintos años y provenientes de la provincia de salta*. Cordova : s.n., 2012. pág. 2, Paper.

FAOSTAT. 2013. Organización de las naciones unidas para la alimentacion y la agricultura. *Ganaderia primaria*. [En línea] 2013. [Citado el: 13 de Octubre de 2015.] <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QL/S>.

HAMROCK, Bernard. *Elementos de máquinas*. [trad.] Ana García. Mexixo D.F : McGRAW-HILL, 2000. 0-256-19069-09.

KONGSKILDE. [En línea] [Citado el: 15 de Febrero de 2017.] <http://www.kongskilde.com/>.

MAKLER. Almacenamiento de granos. [En línea] 04 de Enero de 2006. [Citado el: 15 de 12 de 2016.] <http://www.maklerseguros.com.ar>.

MILLS, David. *Pneumatic Conveying Design Guide*. Oxford : s.n., 2004. 0 7506 5471 6.

NATIONS, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED. Un futuro sembrando hace miles de años. [En línea] 10 de Febrero de 2013. [Citado el: 23 de 12 de 2016.] <http://www.fao.org/quinoa-2013/what-is-quinoa/nutritional-value/es/>.

NORTON, Robert. *Diseño de maquinaria*. [trad.] Rodolfo Navarro. Massachusetts : McGRAW-HILL, 2004. 007-2864478.

PERALTA, Eduardo I. La quinua en Ecuador. [En línea] 15 de Noviembre de 2009. [Citado el: 22 de 11 de 2016.] <http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/ESTADO%20DEL%20ARTE%20QUINUA%20.pdf>.

RIBA, Charles. *Diseño concurrente*. Catalonia : s.n., 2002.

RODACCIAI. Aceros inoxidables austeno-ferriticos (duplex). [En línea] 2012. [Citado el: 15 de Diciembre de 2016.] <http://www.rodacciai.es/prodotti.php?pid=31>.

SHIGLEY. *Diseño en ingeniería mecánica*. novena. New York : McGraw-Hill, 2011. pág. 331. 978-0-07-352928-8.

SUMITEC. Sumistros tecnicos S.A. [En línea] 2010. [Citado el: 12 de Diciembre de 2016.] <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>..

VEGA, Juan. *Diseño y construcción de sistema de transporte neumático.*
Bucaramanga : s.n., 2009.

