

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**UTEC**

**Ingeniería Mecánica**



**OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS  
GEOMÉTRICOS DE UNA LAVADORA DE  
QUINUA, USANDO EL MÉTODO DE PIV.**

**GEOMETRICAL PARAMETERS  
OPTIMIZATION OF QUINOA WASHING  
MACHINE USING PIV.**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

**Alumno**

**Luis Mateo Callupe Espinoza**

**Código 201210036**

**Asesor**

**Prof. Samuel Charca Mamani**

**Lima – Perú**

**Julio 2017**

La Tesis

OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE UNA LAVADORA  
DE QUINUA USANDO EL MÉTODO DE PIV.

Ha sido aprobada

-----

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

-----

[Profesor Samuel Charca Mamani]

-----

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

Dedicatoria:

A Dios, mis padres, hermana y sobrina, por su apoyo incondicional.

Agradecimientos:

Al profesor Samuel Charca por darme la oportunidad de pertenecer a su equipo.

Al profesor Emir Vela por facilitarme su cámara.

Al profesor José Luis Mantari y al profesor Helard Álvarez

A los amigos que fui conociendo durante la elaboración de esta tesis.

# ÍNDICE

	Pág.
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xiii</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Presentación de la Problemática .....	2
1.2 Justificación .....	3
1.3 Hipótesis.....	3
1.3.1 Hipótesis principal.....	3
1.3.2 Hipótesis específica .....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo Principal.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>5</b>
<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>5</b>
2.1 La quinua.....	5
2.2 Propiedades nutricionales .....	6
2.2.1 Técnicas de lavado tradicionales .....	7
2.2.1.1 El pisado.....	7
2.2.1.2 Venteo.....	8
2.2.1.3 Batán.....	8
2.2.1.4 Colado.....	8
2.2.2 Equipos de lavado industriales .....	9
2.2.2.1 Escarificador PT-800.....	9
2.2.2.2 Escarificador QUI-300-NAC.....	10
2.3 Historia de velocimetría por imágenes de partículas (PIV).....	10
2.4 Principios Básicos de PIV en 2D.....	11

2.4.1 Método I: Correlación Cruzada Directa (CCD) .....	12
2.4.2 Método II: Transformadas Rápidas de Fourier (FFT).....	13
2.5 Reología del sistema líquido-partícula .....	14
2.6 Caracterización de un flujo caótico .....	15
2.7 PIVlab.....	17
2.8 Resumen.....	17
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>18</b>
<b>METODOLOGÍA, MATERIALES Y ALCANCES.....</b>	<b>18</b>
3.1 Variedad de quinua.....	19
3.2 Parámetros que influyen en el pre-lavado .....	19
3.3 Parámetros que influyen en el lavado de los granos de quinua .....	20
3.4 Índice afrosimétrico.....	20
3.5 Configuración experimental para la obtención de imágenes.....	22
3.6 Configuración del Software PIVlab .....	23
3.7 Validación de los valores de velocidad de PIV .....	24
3.8 Resumen.....	25
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>26</b>
<b>RESULTADOS Y ANALISIS: PARAMETROS DE PRE-LAVADO .....</b>	<b>26</b>
4.1 Concentración del agua/quinua .....	27
4.2 Influencia del tiempo de remojo y temperatura del agua. ....	27
4.3 Resumen.....	28
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>29</b>
<b>RESULTADOS Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN RECIPIENTES CERRADOS.....</b>	<b>29</b>
5.1 Influencia de las rpm al flujo.....	29

5.2 Influencia de la longitud de las paletas en el flujo .....	31
5.3 Número de Reynolds del sistema .....	32
5.4 Caracterización de los vórtices.....	34
5.5 Formación de vórtices .....	35
5.6 Límite máximo de velocidad angular .....	35
5.7 Análisis adimensional.....	36
5.7.1 Ecuación adimensional del número Reynolds.....	37
5.7.2 Ecuación adimensional del número de potencia.....	38
5.8 Resumen.....	39
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>40</b>
<b>SELECCIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO .....</b>	<b>40</b>
6.1 Lista de exigencias.....	40
6.2 Estructura de funciones .....	41
6.3 Representación de la estructura de funciones.....	41
6.3.1 Alternativa 1:.....	42
6.3.2 Alternativa 2:.....	42
6.4 Elección de la estructura de funciones .....	42
6.5 Matriz morfológica.....	43
6.6 Concepto solución .....	44
6.6.1 Concepto solución 1: .....	44
6.6.2 Concepto solución 2: .....	44
6.6.3 Concepto solución 3: .....	45
6.6.4 Concepto solución 4: .....	45
6.7 Evaluación de los conceptos de solución: .....	45
6.8 Coordenadas cartesianas de los proyectos preliminares.....	47
6.9 Resumen....	48

<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>49</b>
<b>ANÁLISIS DE DISEÑO Y VALIDACIÓN .....</b>	<b>49</b>
7.1 Partes y funcionamiento de la lavadora de quinua. ....	49
7.2 Análisis de potencia y esfuerzos.....	50
7.3 Validación de los parámetros que influyen en el lavado. ....	51
7.4 Resumen. ....	52
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
8.1 CONCLUSIONES.....	53
8.2 RECOMENDACIONES. ....	55
<b>TRABAJOS A FUTURO .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>62</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: El pisado, (Fuente: innovación & tecnología-chile). .....	7
Figura 2: Ventero, (Fuente: Sagaseedsperú).....	8
Figura 3: batan, (Fuente: Ecured.cu). .....	8
Figura 4: Colado, (Fuente: thenextrace.net). .....	9
Figura 5: Escarificador PT-800 (Fuente: Alnicolsa del Perú). .....	9
Figura 6: Escarificador QUI-300-NAC (Fuente: máquinas-innova). .....	10
Figura 7: Metodología de evaluación de PIV (Fuente: elaboración propia) .....	11
Figura 8: plano de correlación de dos ventanas de interrogación (Fuete: Elaboración propia).....	13
Figura 9: Análisis de correlación cruzada en el dominio de la frecuencia en grabaciones de doble imagen/exposición única (Fuente: elaboración propia). .....	13
Figura 10: Imagen de un fluido caótico. (Fuente: Paper "Dynamic Topology in Spational Chaos"). .....	16
Figura 11: Puntos geométricos (a) imagen Hiperbólica e (b) imagen elíptica (Fuente: Caos, fluidos y flujos).....	16
Figura 12: Flujograma de la metodología propuesta. ....	18
Figura 13: Prototipo de tambor giratorio para las pruebas experimentales. ....	20
Figura 14: Prueba afrosimétrica de altura de espuma para cuantificar la cantidad de saponina presente en la quinua. ....	21
Figura 15: Configuración experimental para pruebas con PIV .....	22
Figura 16: (a) tamaño de la ventana de interrogación (b) intensidad de imagen de un grano de quinua 10x10 pixeles. ....	23
Figura 17: calibración para obtener la velocidad de los vectores.....	24
Figura 18: (a) grano iniciando la caída libre, (b) grano con 2 mm de recorrido, (c) grano con 4 mm de recorrido, (d) grano con 37 – 2 + 2 mm de recorrido, (e) grano con 76 – 3 + 3 mm de recorrido, (f) grano con 96 – 4 + 4 mm de recorrido. ....	24
Figura 19: Diagrama comparativo de la velocidad calculada y la velocidad estimada usando PIV. ....	25
Figura 20: % Peso de saponina – Relación agua/quinua.....	27
Figura 21: Influencia del remojo y temperatura del agua cruda en el lavado de quinua	28

Figura 22: Distribución del vector de velocidades y las velocidades promedio de las partículas (a) 60 rpm, (b) 40 rpm y (c) 13 rpm.....	30
Figura 23: Influencia de la velocidad angular del tambor hacia los granos de quinua...	30
Figura 24: (a) flujo con paleta de 10 mm, (b) flujo con paleta de 20 mm, (c) flujo con paleta de 30 mm, (d) flujo con paleta de 40 mm, (e) flujo con paleta a 50 mm.....	31
Figura 25: Influencia de la longitud de las paletas, como función de la velocidad angular. ....	32
Figura 26: N° de Reynolds en función de las rpm de impulso. ....	33
Figura 27: Puntos elíptico, formado por el campo vectorial de la gradiente de velocidad en la superficie de las paletas (50 mm long. paleta a 60 rpm).....	34
Figura 28: Punto hiperbólico, formado por el campo vectorial, consecuencia del choque entre 4 vórtices (50 mm long. paleta a 60 rpm).....	34
Figura 29: Formación de vórtices en función del número de Reynolds, en un tiempo de 0,106 segundos. ....	35
Figura 30: Formación de vórtices producto de las rpm´s del tambor (50 mm long. paleta a 60 rpm ~0,160 segundos).....	36
Figura 31: Caja Negra.....	41
Figura 32: Alternativa de solución N°1 .....	42
Figura 33: Alternativa de solución N°2.....	42
Figura 34: Tambor giratorio impulsado por una manivela.....	44
Figura 35: Tambor giratorio impulsado por un motor eléctrico.....	44
Figura 36: Tambor giratorio impulsado por una bicicleta estacionaria.....	45
Figura 37: Tambor giratorio, impulsado por una bicicleta, con la opción de desplazamiento. ....	45
Figura 38: Evaluación técnico - económica .....	47
Figura 39: (a) Máquina en posición de lavado, (b) máquina en posición de transporte. 50	
Figura 40: Validación de la máquina lavadora de quinua. ....	52
Figura 41: Análisis cinemático del contacto entre el tambor y la rueda.....	63
Figura 42: Diagrama de cuerpo libre dinámico. ....	63
Figura 43: Diagrama cinemático de la máquina en funcionamiento. ....	65
Figura 44: Diagrama de cuerpo libre estático de la lavadora de quinua.....	65
Figura 45: Diagrama de cuerpo libre del eje masa. ....	66
Figura 46: Gráfica de las fuerzas cortantes que se presenta en el eje masa. ....	66

Figura 47: Gráfica de los momentos flectores que se presentan en el eje masa.....	67
Figura 48: Perno que une el tambor y el brazo pivot. ....	68
Figura 49: Gráfica de las fuerzas cortantes que se presenta en el perno. ....	68
Figura 50: Gráfica de los momentos flectores que se presentan en el perno.....	68
Figura 51: Voladizo que une la estructura soporte con la bicicleta.....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Comparación del contenido de aminoácidos esenciales (mg/100g) en granos de quinua, cereales, frejol, carne, pescado, leche y proteína patrón [5].....	6
Tabla 2: Matriz experimental entre la temperatura y tiempo de remojo. ....	26
Tabla 3: Matriz experimental de la relación de las rpm del tambor y la longitud de paletas. .....	29
Tabla 4: Magnitudes físicas que conforman la ecuación $\pi_1$ . ....	37
Tabla 5: Magnitudes físicas que conforman la ecuación $\pi_2$ . ....	38
Tabla 6: lista de exigencias para la lavadora de quinua de capacidad de 10 kg. ....	40
Tabla 7: Matriz morfológica de las funciones de la máquina.....	43
Tabla 8: Evaluación técnica del concepto solución.....	46
Tabla 9: Evaluación económica del concepto solución.....	46
Tabla 10: Tabla de resumen de valores mínimos permisibles.....	51
Tabla 11: Calculo de la potencia para el giro del tambor de diseño.....	62

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: “Cálculo de la Potencia” .....	62
Anexo 2: “Análisis de la fuerza de contacto entre el tambor y la rueda” .....	63
Anexo 3: “Análisis del eje masa” .....	65
Anexo 4: “Análisis del eje del tambor” .....	68
Anexo 5: “Análisis de unión por soldadura” .....	70
Anexo 6: “Plano de estructura soporte” .....	71
Anexo 7: “Plano de brazo pivot, eje pivot, soporte de tambor” .....	72
Anexo 8: “Plano de ensamble de la estructura posterior” .....	73
Anexo 9: “Plano de ensamble tambor interior” .....	74

## RESUMEN

La presente tesis se realizó con el objetivo de optimizar los parámetros que influyen en el proceso de lavado de los granos de quinua. Para tal fin, se diseñó un prototipo de lavadora de quinua en base a un tambor giratorio hecho de acrílico de 250 gr de capacidad de mezcla quinua/agua. Cuando el tambor está en un régimen estable de movimiento (giro), una cámara de alta velocidad (188 cuadros/segundos) capta imágenes del movimiento de la mezcla. Estas imágenes se utilizan para medir el comportamiento del fluido usando el método de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Las rpm del tambor, tamaño de las paletas, la relación agua/quinua, tiempo de remojo y temperatura del agua, fueron parámetros que se consideraron, para obtener la mayor interacción entre granos que garantice una limpieza suficiente (eliminar la saponina). Con estos resultados y utilizando un análisis dimensional, se determinó la ecuación de diseño, considerando el número de Reynolds y el número de Potencia como parámetros adimensionales. Seguidamente, usando la metodología VDI2225, se evaluaron cuatro diferentes propuestas que impulsen (fuente de movimiento) el diseño de lavadora de quinua. El diseño seleccionado es similar al presentado por Richard Hewitt, que consta de un tambor giratorio, impulsada por una bicicleta. Finalmente, considerando los parámetros de operación ya establecidos, se probó la máquina, lavando el tipo de quinua Amarilla Maranganí; consiguiendo reducir el contenido de saponina en peso de 7% a  $0,04 \pm 0,03\%$ , cumpliendo con los estándares de calidad impuestos por INDECOPI según la norma “NTP 011.460:2016 GRANOS ANDINOS”.

### **PALABRAS CLAVES:**

Velocimetría por imágenes de partículas, interacción, saponina, análisis adimensional, número de Reynolds.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La quinua (*Chenopodium quinoa willd*), es el cultivo que forma parte del ecosistema andino y ha sido cultivada por los campesinos de las altas regiones de los Andes desde la época del Imperio de los Incas [1]. La quinua, fue el reemplazo prioritario del maíz, habiéndose aclimatado además en muchos puntos de la costa [2]. Actualmente, el cultivo de quinua tiene una distribución mundial, se encuentra en América (desde Canadá hasta Chiloé en Chile), Europa, Asia y África, obteniendo en todos estos lugares resultados aceptables en cuanto a la adaptación del cultivo y su producción. Inicialmente, se hizo conocida en Europa, Asia y África, a través de las investigaciones en diversificación de cultivos efectuadas por estudiantes sudamericanos [3], obteniendo resultados que han sido acogidos por investigadores europeos y empresas interesadas en la distribución de productos vegetativos y naturales [4]. La quinua, por su alto valor proteico, balance adecuado de aminoácidos esenciales, alto contenido de lisina, minerales, vitaminas, así como por la gran adaptación a diferentes condiciones climáticas, constituye un producto de fácil elección para los consumidores de productos naturales, sanos y nutritivos [5]. Actualmente está siendo difundida en Inglaterra, Alemania, Dinamarca, España, Italia, Francia, Rusia, Portugal, el Himalaya, Sur este de Asia, y Namibia [6]. Para el año 2013, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró “Año Internacional de la Quinua”, como un reconocimiento de las prácticas ancestrales de los pueblos andinos, que han logrado preservar la quinua en su estado natural como alimento para las generaciones presentes y futuras, a través de las prácticas ancestrales de vivir en armonía con la naturaleza [5].

## 1.1 Presentación de la Problemática

En el Perú, las áreas de sembrío han aumentado de una manera sostenida, de 29 mil hectáreas al 2005, 38 mil al 2011, a 47 mil al 2013 y a 68 mil hectáreas en 2014 (43% de crecimiento en comparación del año anterior). El volumen de la producción también ha crecido en esa misma proporción, logrando producir 114 mil toneladas de quinua en el año 2014. Se proyecta alcanzar para el 2020, un volumen de 212 mil toneladas, requiriendo para ello aproximadamente 113,9 mil hectáreas, es decir 45,8 mil hectáreas adicionales [3], un promedio de 7,2 mil hectáreas adicionales por año. Hasta el año 2011, cerca al 99.5% de la producción de quinua se centraba en la sierra; conforme a los siguientes años, se observa una disminución de dicha participación por el impulso de la producción en la costa, a fin de cubrir la mayor demanda nacional e internacional. Para el año 2014, la producción de quinua llega a un pico elevado; consiguiendo que, en la costa llegue a una participación del 40% de la producción nacional (45,2 mil toneladas) [3]. De esta, la región costera de Arequipa es la responsable de casi el 71%, de manera que la producción estacional básicamente en la sierra se observaba entre los meses de abril a julio, hora se amplía a todo el año.

La gran producción de la quinua en la costa (quinua inorgánica), trajo que los precios en chacra comenzaran a disminuir considerablemente, logrando para el 2014 reducir de S/12,3 por kilo a S/5.5 a S/5.6 por kilo el precio en chacra [3]. A finales de ese mismo año, a consecuencia del uso excesivo de plaguicidas, los controles aduaneros de Estados Unidos, reportaron el rechazo a los embarques de quinua Peruana, debido a que, superó el límite máximo de residuos de plaguicidas, lo que redujo aún más los precios en chacra de la quinua; aunque, arrastrando del mismo modo el precio de la quinua orgánica, para el 2015 las autoridades sanitarias de Estados Unidos aprobaron el ingreso de la quinua Peruana; sin embargo, los precios en chacras de la quinua no se habían recuperado, siendo los agricultores de pequeña escala los que sufrieron este gran impacto; en especial, cuando la quinua se comercializa sin lavar (desaponificar). La quinua lavada prácticamente duplica su precio. Actualmente, en el mercado existen diferentes equipos que se utilizan para realizar el proceso de lavado; sin embargo, son equipos industriales costosos y de gran capacidad. Desarrollar una lavadora de baja capacidad, orientado a pequeños productores es una necesidad y un reto.

## **1.2 Justificación**

La excesiva producción por parte de las zonas costeras, ha logrado que el precio por kilo de quinua en chacra disminuya considerablemente, perjudicando a los pequeños productores. Una forma de mejorar los precios en chacra es lavando la quinua, de esta manera se da un valor agregado al producto, aumentando su precio. Sin embargo, los métodos tradicionales de lavado que suelen usarse en el altiplano peruano, demandan grandes cantidades de esfuerzo físico y tiempo, por lo que, en la mayoría de casos, los agricultores venden su producto en estado natural, esto es aprovechado por los intermediarios que pagan un precio por debajo del mínimo. Si bien, ya se han creado equipos para el lavado de quinua, estos tienen una capacidad elevada y están dirigidos a productores de gran escala; incluso, suelen ser usadas por los intermediarios en la mayoría de los casos; además, son costosos y demandan costos de operación elevados. Es por ello la importancia de evaluar los parámetros que afectan el lavado de quinua en un sistema de lavado rotatorio, de esta manera lograr una lavadora óptima y eficiente, orientada a pequeños productores.

## **1.3 Hipótesis**

### **1.3.1 Hipótesis principal**

- Con el método de velocimetría por imágenes de partículas, se logra determinar los parámetros de diseño óptimos, para una máquina lavadora de quinua rotativa, que logre reducir el contenido de saponina en los granos de quinua.

### **1.3.2 Hipótesis específica**

- El producto final son los granos de quinua saludables, cuyo contenido de saponina está por debajo del máximo permitido, según los estándares de calidad impuestos por INDECOPI.

- El método de PIV mide el comportamiento del flujo de los granos de quinua mediante pruebas experimentales, permitiendo caracterizar el comportamiento ideal de un flujo, que garantice el mayor contacto entre granos.
- El prototipo de lavadora de quinua se adapta a los requerimientos y necesidades de los pequeños productores.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo Principal**

- Optimizar los parámetros de diseño de una lavadora de quinua, mediante el método de velocimetría por imágenes de partículas, que logre una remoción significativa de saponina de la quinua apta para el consumo humano.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar los parámetros y condiciones óptimas de lavado que reduzcan el porcentaje en peso de saponina en los granos de quinua, según la norma NTP 011.460:2016.
- Caracterizar el proceso de lavado, mediante los parámetros que influyen en la remoción de saponina durante el proceso de lavado de quinua, usando la técnica de PIV.
- Diseñar y construir una máquina lavadora de quinua, con capacidad de 10 kilogramos (que validen los resultados obtenidos), impulsada por energía no convencional y de bajo costo.

## CAPÍTULO II

### ESTADO DEL ARTE

Este capítulo detalla el origen de la quinua, su importancia nutricional y por qué es necesario lavarla antes de consumirla (extraer la saponina); además, las diferentes técnicas de lavado (tradicionales y modernas) y el uso de nuevas técnicas de caracterización de flujos usando PIV como una alternativa para la optimización de diseños de equipos.

#### **2.1 La quinua**

El origen de la quinua se atribuye a la zona andina del Altiplano entre Perú y Bolivia, donde fue ampliamente cultivada por las culturas precolombinas [3]. Su cultivo y producción estuvo enmarcada en las zonas de mayor altitud que van desde los 2600 a 4000 msnm, logrando extenderse por todo el altiplano, además de valles interandinos y otras zonas como Lambayeque, Ica y Tacna. Según lo reportado por el IV Censo Nacional Agropecuario del año 2012. La quinua ha ido adquiriendo diferentes adaptaciones y modificaciones de acuerdo al clima, suelos, altitud y precipitación pluvial. Las variedades de quinua se clasifican según el lugar de cultivo, tamaño, color y sabor; sin embargo, todos los granos de quinua presentan un recubrimiento llamado “Saponina”. La saponina es una capa que envuelve al grano, dicho envoltivo se encuentra en la zona del pericarpio del grano; por otro lado, consumir saponina influye de forma negativa sobre la salud de las personas y los animales [7], además la saponina es de sabor desagradable lo que conlleva a la necesidad de ser removido, ya sea por lavado u otros procesos, es por esta razón que Indecopi estableció la norma “NTP 011.460:2016 GRANOS ANDINOS” [8], que especifica las características bromatológicas de ausencia de saponina en los granos de quinua, ideal para el consumo y comercialización.

## 2.2 Propiedades nutricionales

Lo que mejor caracteriza a la quinua es su valor nutritivo, la calidad de sus proteínas y balance son superiores comparados a los cereales tradicionales, debido al elevado contenido de aminoácidos esenciales de su proteína como se muestra en la Tabla 1, la quinua es considerada como el único alimento del reino vegetal que provee todos los aminoácidos esenciales [9]. La literatura en nutrición humana indica que solo cuatro aminoácidos esenciales probablemente limiten la calidad de las personas, estos son la lisina, metionina, treonina y triptófano, siendo la lisina la más importante, puesto que, aporta en la formación de todos los organismos del cuerpo humano, desempeña un papel fundamental en la absorción del calcio, es esencial para la formación de hormonas, enzimas y anticuerpos [10].

Aminoácido	Quinua	Arroz	Cebada	Maíz	Trigo	Frejol	Carne	Pescado	Leche	Patrón FAO
Arginina	<b>7.3</b>	6.9	4.8	4.2	4.5	6.2	6.4	5.6	3.7	-
Fenilalanina	<b>4</b>	5.09	5.2	4.7	4.8	5.4	4.1	3.7	1.4	6
Histidina	<b>3.2</b>	2.1	2.2	2.6	2	3.1	3.5	-	2.7	-
Isoleucina	<b>4.9</b>	4.1	3.8	4	4.2	4.5	5.2	5.1	10	4
Leucina	<b>6.6</b>	8.2	7	12.5	6.8	8.1	8.2	7.5	6.5	7
Lisina	<b>6 - 8.4</b>	3.8	3.6	2.9	2.6 - 2.2	7	8.7	8.8	7.9	5.5
Metionina	<b>2.3</b>	2.2	1.7	2	1.4	1.2	2.5	2.9	2.5	3.5
Treonina	<b>3.7</b>	3.8	3.5	3.8	2.8	3.9	4.4	4.3	4.7	4
Triptófano	<b>0.9</b>	1.1	1.4	0.7	1.2	1.1	1.2	1	1.4	1
Valina	<b>4.5</b>	6.1	5.5	5	4.4	5	5.5	5	7	5

Tabla 1: Comparación del contenido de aminoácidos esenciales (mg/100g) en granos de quinua, cereales, frejol, carne, pescado, leche y proteína patrón [5].

las variedades de quinua se clasifican según a la zona geográfica donde se cultiva, entre estas tenemos **la quinua de valle**, crecen en valles entre los 2000 y 3000 metros de altitud. Estas quinuas son de gran tamaño y tienen un largo periodo de crecimiento, dentro de este grupo tenemos la Rosada Junín, Nariño, Amarilla de Maranganí, Dulce de Quitopampa y otras. **La quinua del Altiplano**, se hallan alrededor del lago Titicaca y son resistentes a las heladas; en este grupo se encuentran la Blanca de Juli, Kanccolla,

Chewaca y Witulla. **La quinua de terrenos salinos o salares**, se cultivan en las llanuras del altiplano boliviano y soportan terrenos salinos y alcalinos. En este grupo están las variedades Kellu, Michka y Real Blanca. **La quinua del nivel del mar**, en el sur de Chile (concepción y Valdivia), estas quinuas están adaptadas a climas húmedos y con latitud 30° LS. Las variedades Baer, litu y Pichaman pertenecen a este grupo. Por último; **la quinua de yungas**, se localizan en los valles interandinos de Bolivia, su adaptación a climas subtropicales les permite adecuarse a niveles más altos de precipitación y de calor [11]. Como se mencionó con anterioridad, todas las quinuas presentan la saponina en mayor o menor grado; por ello, es la importancia del lavado; a continuación, se detallan las diferentes técnicas y tecnologías de lavado de la quinua.

### 2.2.1 Técnicas de lavado tradicionales

Comúnmente son usados por los agricultores o consumidores; a continuación, detallamos algunos de ellos:

#### 2.2.1.1 El pisado

Este método consiste en colocar la quinua en un recipiente de piedra, luego una persona pisará la quinua, provocando el rozamiento de los granos (ver Figura 1), de esta forma la saponina se desprende de la superficie de la quinua.



Figura 1: El pisado, (Fuente: innovación & tecnología-chile).

### 2.2.1.2 Venteo

Este método consiste en levantar un puñado de quinua con una pala, al caer la quinua, el impacto entre los granos hará que se desprenda la saponina, al mismo tiempo, un flujo de aire (viento) separa la saponina de la quinua. (ver Figura 2).



Figura 2: Ventero, (Fuente: Sagaseedsperú).

### 2.2.1.3 Batán

Aunque el uso exclusivo del batán es moler, en algunos lugares también se usa para lavar en seco o húmedo la quinua (ver Figura 3).



Figura 3: batan, (Fuente: Ecured.cu).

### 2.2.1.4 Colado

Este método es el más conocido y empleado, la extracción de saponina es mucho mejor en comparación con los dos métodos anteriores; sin embargo, el proceso se repite entre 4 a 5 veces, por lo que el esfuerzo físico es mayor (ver Figura 4).



Figura 4: Colado, (Fuente: thenextrace.net).

En conclusión, las técnicas tradicionales implican un consumo considerable de tiempo y trabajo durante el proceso de lavado.

## **2.2.2 Equipos de lavado industriales**

Existen una diversidad de equipos para el lavado de quinua, a continuación, se presentan dos de los equipos más usados de escala industrial.

### **2.2.2.1 Escarificador PT-800**

Esta máquina está diseñada para el pelado o escarificado y separado simultaneo de quinua. Construida en acero inoxidable, tiene un peso de 230 Kg, requiere una fuente de voltaje de 220V a 440V trifásico, puede lavar 350 kilos la hora. Su precio se encuentra alrededor de los 4,800 dólares americanos (ver Figura 5).



Figura 5: Escarificador PT-800 (Fuente: Alnicolsa del Perú).

### 2.2.2.2 Escarificador QUI-300-NAC

Esta máquina realiza la desaponificación tanto seco como en húmedo, toda la estructura es de acero inoxidable, cuyo peso es de 110 Kg, requiere una fuente de voltaje de 220V a 440V monofásico o trifásico, puede lavar 300 kilos la hora. Su precio se encuentra alrededor de los 8,000 nuevos soles (ver Figura 6).



Figura 6: Escarificador QUI-300-NAC (Fuente: máquinas-innova).

Para la realización de un buen diseño de lavadora de quinua, es muy importante poder caracterizar el flujo que garantice una buena interacción entre los granos de quinua; además de esto, el flujo no debe ocasionar que los granos se quiebren, causando mala impresión en el producto final y consiguiendo que los nutrientes de la quinua se pierdan durante el proceso de lavado. Para ello, utilizaremos la herramienta de PIV, que a continuación se detalla.

### 2.3 Historia de velocimetría por imágenes de partículas (PIV)

La observación de objetos en movimiento ha estimulado los primeros experimentos sencillos con configuraciones y herramientas fácilmente disponibles en la naturaleza; sin embargo, con tales herramientas experimentales la descripción de las propiedades del flujo se restringe a las declaraciones cualitativas. Un gran paso que se dio en la investigación de los flujos de fluidos, fue cuando se reemplazó tales observaciones pasivas de la naturaleza por experimentos cuidadosamente planeados, para extraer información sobre el flujo utilizando técnicas de visualización [12]. En 1904 L. Prandtl diseñó un túnel de agua para la visualización del flujo. Prandtl obtuvo información muy

relevante sobre muchas características básicas de los fenómenos de flujo estable e inestable; sin embargo, en ese momento sólo fue posible una descripción cualitativa del campo de flujo, no pudiéndose obtener datos cuantitativos sobre la velocidad del flujo. En la actualidad, el estudio del comportamiento de fluidos a través del procesamiento de imágenes, ha llamado el interés de muchos investigadores; puesto que, ofrece un nuevo y prometedor medio para estudiar la estructura del flujo que, según su naturaleza, existe en una amplia gama de escalas físicas que van desde las más bajas (flujo laminar), hasta las más altas (flujo turbulento) [13].

## 2.4 Principios Básicos de PIV en 2D

Velocimetría por imágenes de partículas (Particle Image Velocimetry, PIV), es una técnica de medición cuantitativa, que permite obtener información del movimiento y velocidad al comparar dos imágenes capturadas en instantes de tiempo diferentes, es decir, separadas por un  $\Delta t$ . Cada imagen es dividida en cuadros pequeños del tamaño de  $L \times L$  pixeles, llamado ventana de interrogación; cada pixel en una matriz que está representada por un número entre 0 a 255 (escala de gris) convirtiendo la imagen en un formato numérico [14]. A continuación, el método estadístico de correlación cruzada evaluará cuadro a cuadro el grado de similitud de cada imagen en función de la intensidad  $I$  del pixel correspondiente. La Figura 7, muestra la metodología de evaluación de PIV para la obtención del campo de vectores de desplazamiento.

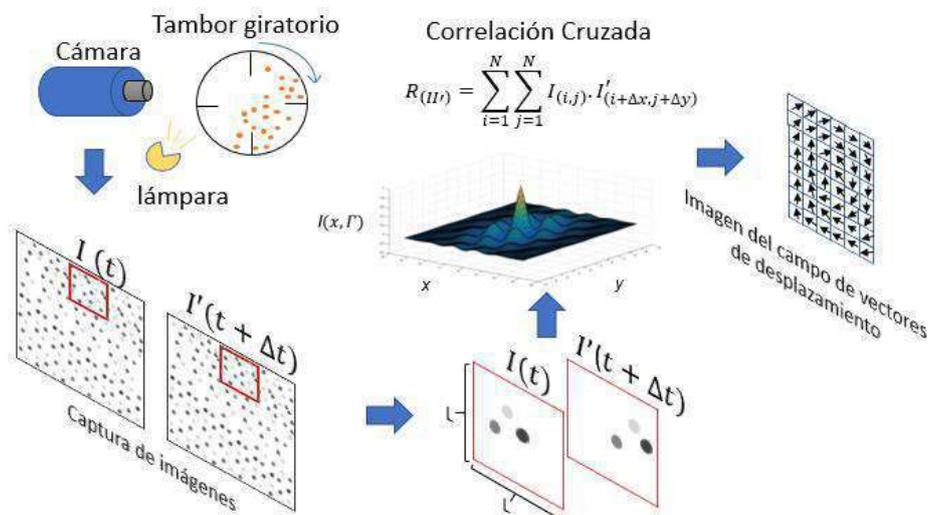


Figura 7: Metodología de evaluación de PIV (Fuente: elaboración propia)

Para el cálculo de correlación entre píxeles, existen dos métodos de similitud que se explicarán a continuación:

#### 2.4.1 Método I: Correlación Cruzada Directa (CCD)

Para obtener el campo de desplazamiento y el de velocidad, se tiene que recurrir a la función de correlación cruzada. Como se mencionó líneas arriba, las imágenes son divididas en cuadros pequeños, llamados ventanas de interrogación. Tomando ambas ventanas correspondientes de las imágenes adquiridas, se calcula la función de correlación espacial entre ellas, obteniendo de esta última el coeficiente de correlación. El pico de dicho coeficiente, permite obtener el desplazamiento buscado, que será el vector que, en el plano de correlación, identifica su posición. La expresión de dicha correlación cruzada  $R$  es [12]:

$$R_{(I,I')} = \int_{a_1}^d I(x,y) \cdot I'(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy \quad (1)$$

Donde  $a_1$  es la ventana de interrogación,  $I(x,y)$  es la intensidad luminosa en la ventana relativa a la primera imagen de interrogación e  $I'(x + \Delta x, y + \Delta y)$  a la segunda imagen respectivamente. Conocida la función, se determina el coeficiente de correlación  $C$  definido como:

$$C_{(\Delta x, \Delta y)} = \frac{R_{(I,I')}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (2)$$

Siendo  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  las desviaciones estándar de las distribuciones de intensidad en la primera y segunda ventana de interrogación respectivamente. Una vez que se obtiene el coeficiente, cuyo valor máximo es la unidad, se calcula los valores de  $\Delta x$  y  $\Delta y$  que corresponden al valor máximo de  $C$ . En la Figura 8, se muestra un plano de correlación

de una pareja de ventanas de interrogación y el desplazamiento resultante, los  $\Delta x$  y  $\Delta y$  son los componentes del vector de desplazamiento.

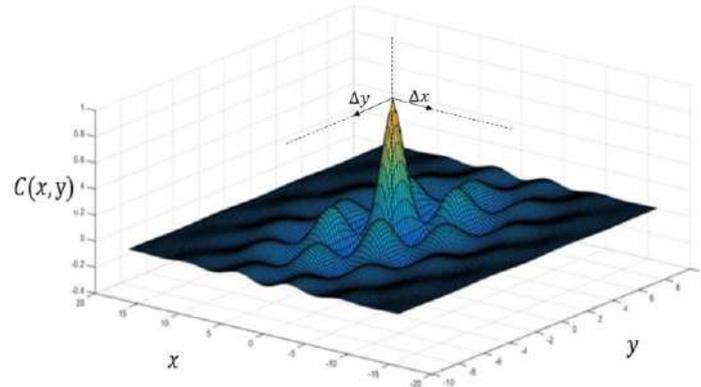


Figura 8: plano de correlación de dos ventanas de interrogación (Fuente: Elaboración propia).

### 2.4.2 Método II: Transformadas Rápidas de Fourier (FFT).

La utilización del coeficiente de correlación resultante del cálculo de la función de correlación directamente en el espacio físico (CCD) podría parecer la única alternativa de solución, para obtener el campo de desplazamiento y velocidad. Sin embargo, se puede recurrir a la función de correlación planteada por Wiener-Khitchine, según el cual, existe una equivalencia entre la anti-transformada de Fourier ( $FFT^{-1}$ ) del espectro de potencia (S) y la función de correlación de la señal considerada. Para el cálculo de la densidad espectral de potencia se cumple el teorema de correlación que indica que la correlación cruzada de dos funciones, es equivalente a una multiplicación de la conjugada compleja de sus transformadas de Fourier [12]. En la Figura 9, se observa un análisis de grabaciones de doble imagen/exposición única.

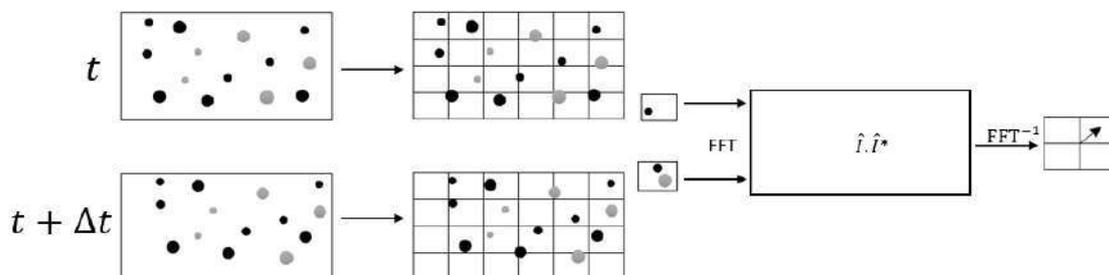


Figura 9: Análisis de correlación cruzada en el dominio de la frecuencia en grabaciones de doble imagen/exposición única (Fuente: elaboración propia).

Donde  $\hat{I}$  e  $\hat{I}'$  son las transformadas de Fourier de las funciones  $I$  e  $I'$ , el símbolo  $*$  denota la conjugación compleja. Usando la transformada de Fourier, convertimos las dos imágenes al dominio de la frecuencia.

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (3)$$

A continuación, se realiza una transformada inversa de Fourier para producir el plano real de correlación cruzada que tiene las mismas dimensiones espaciales  $M \times N$ , con el propósito de obtener el vector de desplazamiento.

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (4)$$

De acuerdo con ello, es posible recurrir a las transformadas de Fourier del campo de intensidad luminosa de las ventanas de interrogación para calcular la función de correlación. Proceder con este método, permite una reducción notable del costo computacional exigido, debido a que es posible obtener las transformadas de la señal utilizando transformadas discretas rápidas de Fourier (FFT), y la función de correlación a partir del espectro de potencia utilizando la transformada rápida inversa ( $FFT^{-1}$ ) [15]. Por otro lado, es importante mencionar el tipo de fluido que se va analizar con el método PIV; a continuación, se describe la reología de un sistema líquido-partícula.

## 2.5 Reología del sistema líquido-partícula

Los sistemas líquido-partícula son los más comunes en los procesos químicos de mezclado mediante un impulsor y/o tanques giratorios; las razones para procesar sistemas de partículas líquidas en equipos de mezcla son, las de promover reacciones químicas entre el sólido de la partícula y el líquido, obteniendo concentraciones relativamente

uniformes. Existen dos tipos de sistemas líquido-partícula, las de suspensiones de baja concentración, casi libres de sedimentación y las de altas concentración que poseen sedimentación alta (lodos, pastas dentales, etc.) [16]; cuando las partículas no tienen efecto sobre otras partículas cercanas, son sistemas de baja concentración; caso contrario, si se aumentase la concentración de partículas, aumentaría el contacto entre ellas, esto se consigue con el aumento de la suspensión de las partículas, evitando la sedimentación. En mecánica de fluidos se le conoce como fluido Bingham y pertenecen al grupo de los no newtonianos [17] [18]. Los fluidos Bingham se mantienen en sedimentación durante el reposo, al estar sometido a una fuerza externa, las partículas comenzarán a suspenderse, logrando aumentar el contacto entre ellas.

## **2.6 Caracterización de un flujo caótico**

Para poder caracterizar un adecuado flujo en un sistema cerrado, es muy importante definir que es un flujo caótico. Si una fuerza de agitación logra mover un sistema líquido-partícula, conseguirá que las partículas se muevan desordenadamente formando pequeños remolinos periódicos sin coordinación (vórtices), este comportamiento se conoce como caos [19]. La irregular e impredecible evolución temporal de muchos sistemas no lineales ha sido denominada caos, ocurre en oscilaciones mecánicas tales como péndulo, en objetos vibrantes, en fluidos giratorios o calentados, en cavidades laser y en algunas reacciones químicas. Su característica central es que el sistema no repite su comportamiento pasado, ni siquiera se aproxima. Para el caos, la irregularidad es parte de la dinámica intrínseca de su sistema [20]. En algunas situaciones simples, es posible obtener soluciones analíticas, la más representativa es la ecuación Navier-Stokes que describe el movimiento de un fluido; más aún, para fluidos caóticos, las soluciones analíticas están más allá de su alcance.

En el año 2008, Nicholas Oullette y Jerry Gollub, ambos profesores de física de la universidad de Haverford, realizaron experimentos para describir el comportamiento de los fluidos caóticos (ver Figura 10). En su experimento, mezclaron miles de partículas de poliestireno trazadoras fluorescentes en un líquido. A continuación, se dio movimiento

a la mezcla logrando conseguir un escenario caótico que, con el tiempo, cambian de manera irregular y sin repetirse [21].

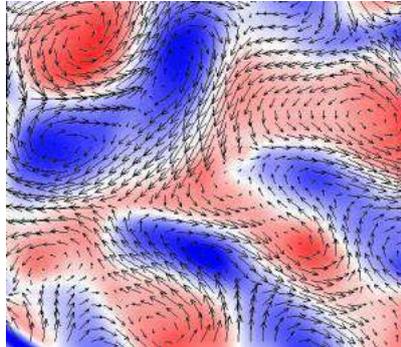


Figura 10: Imagen de un fluido caótico. (Fuente: Paper "Dynamic Topology in Spatial Chaos").

Oullette y Gollub comenzaron a buscar las características geométricas que describen a todo flujo (ver Figura 11), los que se encuentran en el centro de los vórtices, conocido como puntos elípticos y aquellos hacia el cual converge el flujo a lo largo de una dirección, pero de los que diverge a lo largo de otra dirección conocidos como puntos hiperbólicos. Los puntos elípticos, tienen el flujo de remolino alrededor de ellos, mientras que surgen puntos hiperbólicos formados por el encuentro de 4 vórtices [21] [22].



Figura 11: Puntos geométricos (a) imagen Hiperbólica e (b) imagen elíptica (Fuente: Caos, fluidos y flujos).

Una vez localizados los puntos, Oullette y Gollub realizaron un seguimiento de su comportamiento en el tiempo, encontrando que los puntos pueden nacer y morir, esto significa que, al formarse los puntos elípticos e hiperbólicos, estos se encuentran y se aniquilan entre sí. “La velocidad a la que los nacimientos y las muertes se producen, resulta ser una excelente medida de la fuerza del caos en el flujo”, dice Gollub.

## 2.7 PIVlab

PIVlab es un software libre que permite evaluar diferentes tipos de flujos, comparando el movimiento de los pixeles mediante correlación cruzada directa (CCD) o por el método de transformadas rápidas de Fourier (FFT), de una secuencia de imágenes captadas por una cámara de alta resolución; consiguiendo medir los desplazamiento y velocidades de cada pixel y caracterizar la forma geométrica del flujo. Además, nos permite evaluar diferentes tamaños de partículas, debido a que se pueden configurar el tamaño de ventana de interrogación. PIVlab fue desarrollado por Willian Thielicke PhD. y J. Eize Stamhuis PhD. [23], siendo un software muy usado en numerosos estudios científicos de todo el mundo; incluso, el autor Willian Thielicke uso el software para su tesis doctoral “The Flapping Flight of Birds: Analysis and application” el cual trata sobre la forma del vuelo diferentes aves [24]. En el 2014, Álvaro Eduardo Ruiz Morales, en su tesis “Evaluación del PIV como método de Medida en Geotecnia” describe el comportamiento de probetas de concreto sometidas a diferentes cargas estáticas [25]. En el 2012, Jonathan Goldsmith en su tesis “Particle Image Velocimetry and It’s Application to Granular Media” utilizo PIVlab para determinar vórtices que se producen en un flujo granular [26].

## 2.8 Resumen

Se detalló importancia de la quinua en la alimentación de las personas, además de los diferentes procesos existentes de remoción de saponina. Por otro lado, el método PIV es una herramienta que permite medir el comportamiento de un sistema líquido-partícula basado en correlación de imágenes, no obstante, requiere de configuraciones previas para un correcto funcionamiento.

En el siguiente capítulo se detalla la metodología empleada para la configuración experimental con PIV, además, los materiales empleados para las pruebas experimentales; finalmente, se especifica el alcance.

# CAPÍTULO III

## METODOLOGÍA, MATERIALES Y ALCANCES

Para lavar la quinua, se debe cumplir una metodología que consiga extraer la saponina de los granos, evitando que estos pierdan propiedades nutricionales a causa de un mal procedimiento. Durante el proceso de pre-lavado, se deberá tener en cuenta las condiciones para la extracción de la saponina de la capa superficial, mediante los parámetros de tiempo remojo y temperatura, evitando perder sus propiedades nutricionales a causa de la cocción y/o germinación; seguidamente, se explica el proceso de lavado por agitación que consiga extraer la saponina de las demás capas. La Figura 12, muestra un flujograma de la metodología propuesta, teniendo al grano de quinua “Amarilla Marangani” como la variedad de quinua que será usada para las pruebas experimentales.

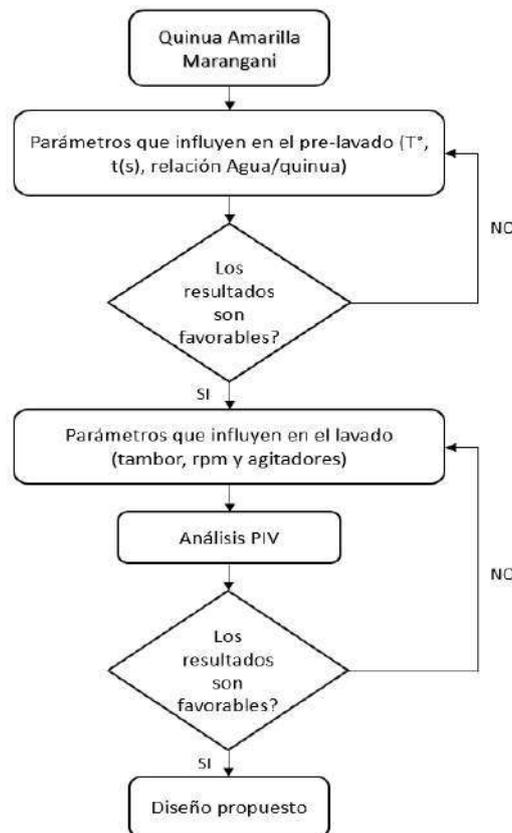


Figura 12: Flujograma de la metodología propuesta.

### **3.1 Variedad de quinua**

Para los siguientes experimentos, se ha empleado quinua de la variedad Amarilla Marangani, procedente del distrito de Tinta (Canchis, 3440 msnm), departamento de Cusco. La zona de cultivo de esta variedad de quinua se encuentra entre 800 a 3500 msnm; son consideradas quinuas de valle cuya planta alcanza una altura de 2 a 3 metros; el ciclo vegetativo es de 60 a 180 días, tiene un sabor amargo debido al alto contenido de saponina (7% en peso de saponina); presenta un color amarillo – anaranjado, la forma del grano es cónico de un tamaño de 1.4 a 1.8 mm [27]. Todos los granos de quinua presentan tres partes que son la episperma, embrión y perisperma; el primero de estos está conformado por cuatro capas, la primera capa determina el color de la quinua, además es de superficie rugosa, la segunda capa es muy delgada y lisa, la tercera capa es una membrana delgada opaca de color amarillo y la cuarta capa es translúcida y está conformada por una sola hilera de células que cubre el embrión [28]. La saponina externa que se encuentra en la primera capa del grano es fácilmente extraída por la acción del agua; pero no así, las que se encuentran en las siguientes capas (saponina interna), donde se necesita un proceso de difusión; en el cual, el agua debe penetrar las membranas celulares, esto se logra con la agitación [29].

### **3.2 Parámetros que influyen en el pre-lavado**

Mediante el proceso de pre-lavado se extrae de saponina de la capa superficial del grano, contando como parámetros a medir la temperatura del agua y el tiempo de remojo. La metodología a emplear es dejar remojar la quinua en diferentes periodos de tipo, variando la temperatura del agua, luego se mide el porcentaje de saponina que aún queda en el grano de quinua. Este parámetro es importante, pues, el remojar la quinua a tiempos elevados y a temperaturas altas, podría dañar al grano, asíndolos menos agradables para el consumidor.

### 3.3 Parámetros que influyen en el lavado de los granos de quinua

El proceso de lavado remueve la saponina de las demás capas que conforman el grano de quinua a través de la agitación, consiguiendo generar mayor interacción entre granos. En la industria agrícola, los campos de fluidos granulares inducidos en un tambor de rotación, tiene una variedad de aplicaciones, incluyendo la mezcla, los procesos de segregado, así como de acabado superficial, tales como lavadoras de granos. Una técnica de lavado de granos de quinua, consiste en sumergir los granos mezclados con agua en un tambor que contiene paletas con ángulo de ataque a  $90^\circ$ , sujetados en las paredes internas del tambor. Bajo este principio, se construyó un prototipo de lavadora de quinua, como se observa en la Figura 13; el tambor tiene un diámetro de 150 mm y 50 mm de longitud; es impulsado por un motor DC quien; a su vez, se alimenta de una fuente de voltaje variable para controlar las rpm del tambor.



Figura 13: Prototipo de tambor giratorio para las pruebas experimentales.

### 3.4 Índice afrosimétrico

Para cuantificar la saponina en los granos de quinua sometidos a diversos tratamientos, se utilizaron el índice afrosimétrico o método de la espuma [5]. Con este método se midió la altura de la espuma que se produce por la saponina (ver Figura 14). Para medir la altura de la espuma, es necesario el uso de materiales tales como; Tubos de ensayo de 160 mm de longitud y 16 mm de diámetro, pipeta volumétrica de 5mL,

cronometro o reloj, balanza, regla con sensibilidad de 1 mm y agua destilada [27]. El procedimiento que se emplea es el siguiente:

- a) Pesar 0,5 +/- 0.02 gr de granos enteros de quinua y colocarlos en un tubo de ensayo.
- b) Añadir 5,0 mL de agua destilada y tapa el tubo.
- c) Poner en marcha el cronometro y sacudir vigorosamente el tubo durante 30 segundos.
- d) Dejar el tubo en reposo durante 30 minutos, luego sacudir otra vez durante 20 segundos.
- e) Dejar en reposo durante 30 minutos más, luego sacudir otra vez durante 30 segundos.
- f) Dar al tubo una última sacudida como el que se da a los termómetros orales.
- g) Dejar el tubo en reposo 5 minutos, luego medir la altura de la espuma al 1 mm más cercano.

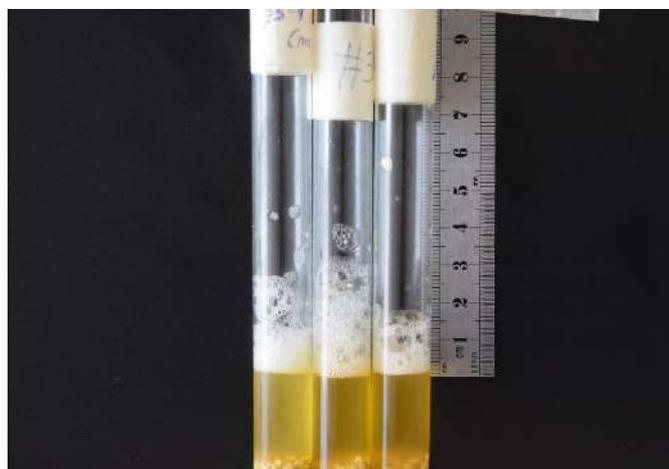


Figura 14: Prueba afrosimétrica de altura de espuma para cuantificar la cantidad de saponina presente en la quinua.

Teniendo la altura de espuma, podemos calcular el contenido de saponina en función la altura y el peso de la muestra.

$$\text{mg saponinas/peso fresco} = \frac{0.646 \times (\text{altura de la espuma en cm}) - 0.104}{\text{peso de la muestra en gr}} \quad (5)$$

$$\% \text{ saponinas} = \frac{0.646 \times (\text{altura de la espuma en cm}) - 0.104}{(\text{peso de la muestra en gr}) \times 10} \quad (6)$$

### 3.5 Configuración experimental para la obtención de imágenes

La Figura 15, muestra el módulo a escala de la lavadora de quinua que se construyó para la medición del comportamiento de flujos. Para la captura de imágenes, se usó una cámara de alta velocidad (188 imágenes por segundo), la resolución de cada imagen obtenida fue de 560x552 píxeles, el lente usado fue NIKON AF\_S cuyo tamaño ocular se encuentra en el rango entre 18 a 300 mm; dos lámparas de 500W, ayudan a mejorar la intensidad de los granos de quinua; puesto que, al reducir el iris del lente para aumentar la velocidad de captura de imágenes, reduce la intensidad de los granos de quinua [12]; finalmente, una PC para el almacenamiento y posterior análisis en PIV.

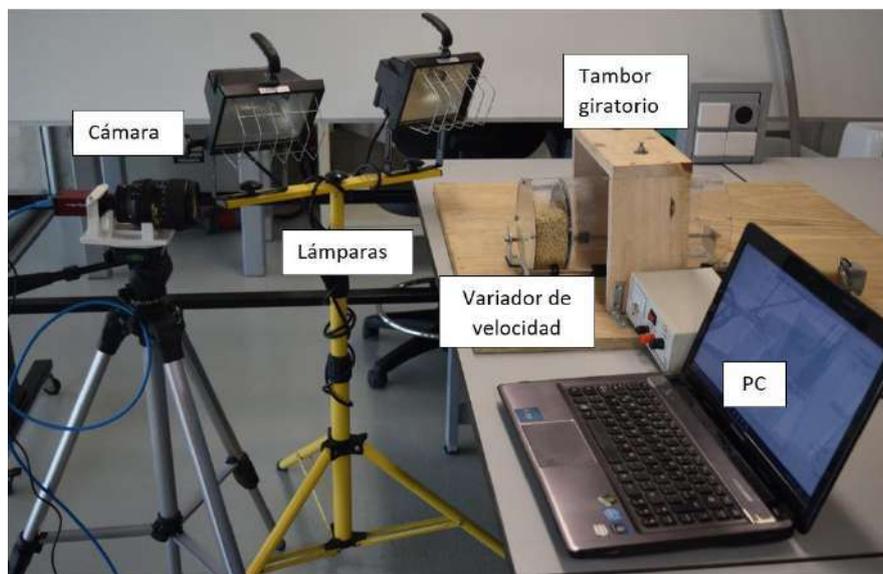


Figura 15: Configuración experimental para pruebas con PIV

Una vez obtenida las imágenes, se realiza el análisis de correlación usando el software PIVlab. En las siguientes secciones se indican los principales parámetros críticos en PIVlab a tomar en consideración.

### 3.6 Configuración del Software PIVlab

- **Tamaño de ventana de interrogación**, esta opción nos permite dar el tamaño de ventana de interrogación que se usó para la búsqueda y correlación de las partículas de quinua durante el lavado (ver Figura 16). Para el análisis, se consideró un tamaño de 10x10 píxeles; puesto que, viene a ser aproximadamente el tamaño de grano de la quinua [30].

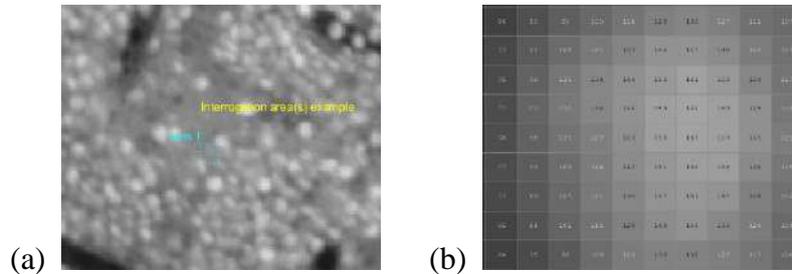


Figura 16: (a) tamaño de la ventana de interrogación (b) intensidad de imagen de un grano de quinua 10 x 10 píxeles.

- **El algoritmo a usar es Transformadas de furrier**; debido a que la potencia de cálculo es mayor en comparación con el método de correlación directa CCD [30].
- **Calibración de velocidad**, consiste en tomar una medida conocida, en este caso la longitud de una paleta y la frecuencia de captura de imágenes de la cámara, con el propósito de obtener la velocidad de los vectores (Figura 17).

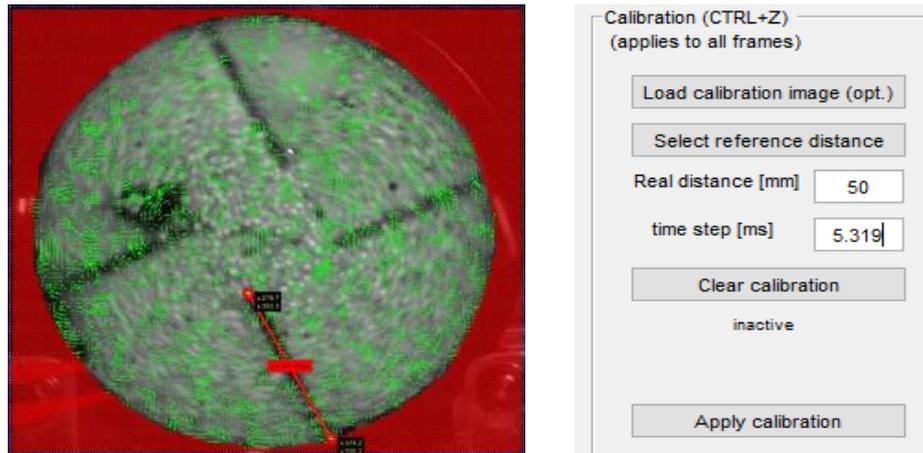


Figura 17: calibración para obtener la velocidad de los vectores.

### 3.7 Validación de los valores de velocidad de PIV

A pesar de que PIVlab cuenta con una calibración para los valores de velocidad, es necesario e importante que se validen estos resultados, incluso el mismo Thielicke recomienda realizar este procedimiento previo. Una forma de validar los resultados obtenidos con el método PIV, es comparar la velocidad que se obtiene usando PIV con valores medidos usando ecuaciones de caída libre; para ello, se deja caer un grano de quinua desde el reposo, una regla medirá la distancia recorrida del grano en diferentes instantes de tiempo, como se observa en la Figura 18.

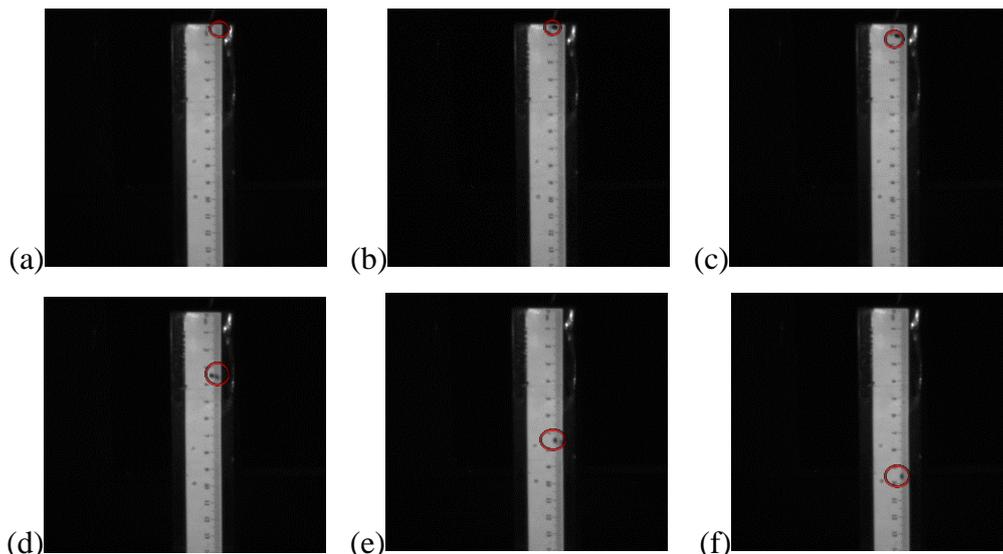


Figura 18: (a) grano iniciando la caída libre, (b) grano con 2 mm de recorrido, (c) grano con 4 mm de recorrido, (d) grano con ~37 mm de recorrido, (e) grano con ~76 mm de recorrido, (f) grano con ~96 mm de recorrido.

En la Figura 19, se aprecia un cuadro comparativo entre el valor calculado usando PIV y por la ecuación (9). Las primeras dos medidas presentan un porcentaje de error mínimo (2-3%), la tercera medida llega a un error del 5%; sin embargo, las siguientes tres últimas medidas el error se encuentra entre 10 a 13%; esto se debe a que, al aumentar la velocidad de caída, los pixeles comienzan a alargarse, consiguiendo que la dispersión en la medida aumente [12], por consiguiente, aumente el error.

$$e = \frac{V_f^2 - V_0^2}{2 * g} \quad (7)$$

Para fines experimentales, los valores de velocidad de los granos de quinua observados en esta investigación fluctúan en valores que varían de 200 a 800 mm/s, lo cual da errores aceptables (menores a 5%).

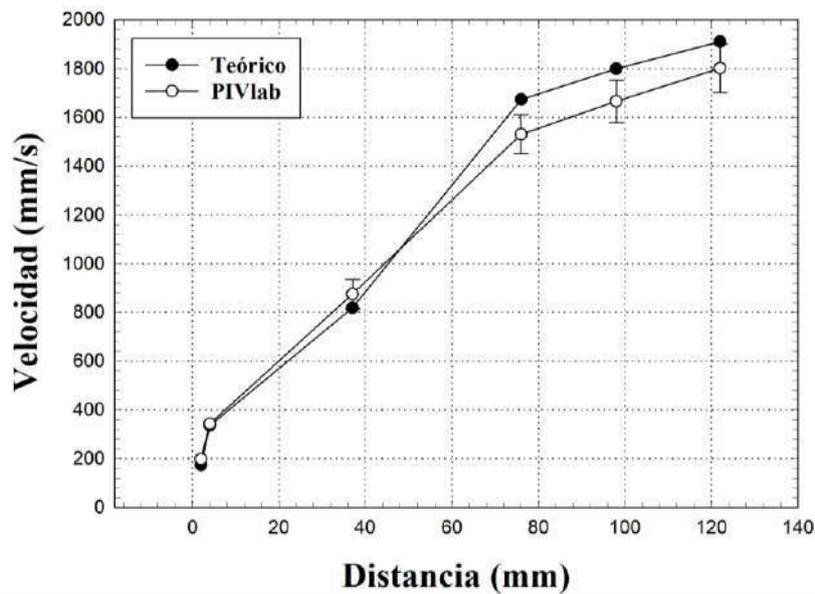


Figura 19: Diagrama comparativo de la velocidad calculada y la velocidad estimada usando PIV.

### 3.8 Resumen

Existen parámetros de prelavado y lavado que tienen efecto significativo que deben ser considerados, siendo el tiempo de remojo y la temperatura de remojo parámetros a estudiar. Además, para usar adecuadamente PIV e interpretar los datos obtenidos correctamente se deben tener especial cuidado en la adquisición de imágenes y la calibración respectiva.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y ANALISIS: PARAMETROS DE PRE-LAVADO

Para que el lavado de la quinua sea efectivo, existen parámetros y condiciones de prelavado que tienen un efecto significativo en el proceso de lavado, parámetros como tiempo de remojo y temperatura de remojo juegan un papel muy importante. Del mismo modo, la relación agua-quinua durante el proceso del lavado, este último aseguraría la mayor interacción quinua/quinua asegurando de esta manera un lavado efectivo. Todas estas pruebas fueron desarrolladas en una probeta con un peso total (agua + quinua) de 5 gr. Para determinar la óptima relación agua-quinua, mezclas de diferentes relaciones (4.5/0.5, 4/1, 3/2, 2.5/2.5, 2/3 y 1/4) se sometieron a procesos de lavado directo en probeta por agitación manual durante 10 minutos con 5 repeticiones cada una, luego de ella la quinua lavada fue secada a 60°C por 2 horas, posterior a ello se realizó la prueba afrosimétrica. Una vez obtenido la relación óptima (agua-quinua) se procedió a estudiar el efecto de los parámetros de remojo (tiempo y temperatura), la matriz experimental para este procedimiento se detalla en la Tabla 2. Del mismo modo una vez completado el proceso de remojo, la quinua fue lavada en una probeta por agitación durante 10 min luego de ella, secada en un horno, posterior a ellos se realizó la prueba afrosimétrica, del mismo modo se hicieron 5 réplicas. A continuación, se detalla los resultados obtenidos.

remojo (min) / temperatura (°C)	10	20	30	40	50	60
18	x	x	x	x	x	x
40	x	x	x	x	x	x
60	x	x	x	x	x	x

Tabla 2: Matriz experimental entre la temperatura y tiempo de remojo.

#### 4.1 Concentración del agua/quinua

La Figura 20 detalla los resultados obtenidos de saponina remanente en la quinua, se puede observar que el comportamiento es no lineal. De los resultados podemos observar lo siguiente, existen dos relaciones agua-quinua en los que se observa mayor reducción de saponina, la relación 4.5/0.5 muestra valores de saponina remanentes en rangos de 0.5 a 0.9 %; sin embargo, siendo la proporción de agua muy alta (la cantidad de quinua es poca), el consumo de agua será muy elevada. La relación 2.5/2.5 alcanzó una reducción en saponina a rangos de 0.65 - 1 %; similar a lo descrito anteriormente. De esta última relación podemos inferir que la relación 2.5/2.5 (1/1) es la adecuada. Por otro lado, a mayor concentración de quina la efectividad del proceso de lavado disminuye, esto se puede atribuir al movimiento de toda la masa de quinua como bloque, evitando o reduciendo la interacción entre los granos de quinua.

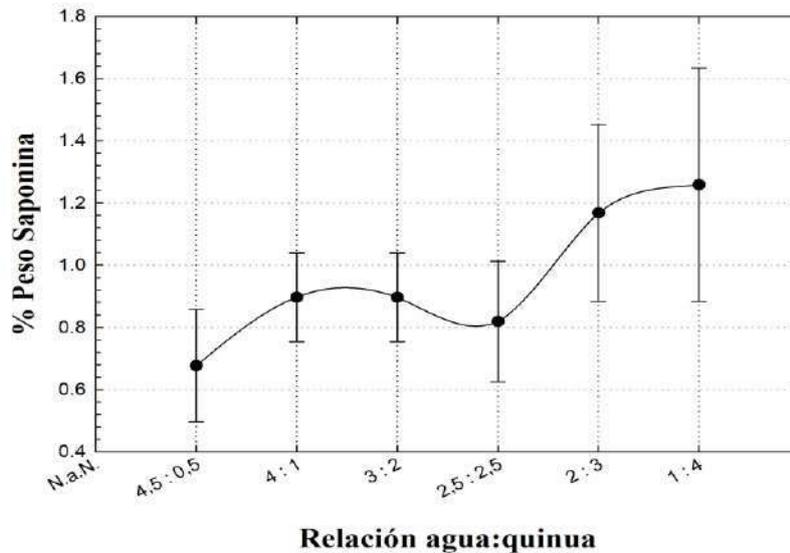


Figura 20: % Peso de saponina – Relación agua/quinua

#### 4.2 Influencia del tiempo de remojo y temperatura del agua.

La Figura 21, muestra los resultados obtenidos. Es claro que a altas temperatura se observa mayor reducción de saponina; sin embargo, mantenerlo a esta temperatura por tiempos prolongados puede tener efectos negativos sobre la quinua, como la cocción con ello la pérdida de nutrientes. En todos los casos (temperaturas) se presenta un comportamiento típico, en el cual se pueden encontrar más de un punto óptimo, esto

puede ser debido a la cinética de la reacción presente en todo el proceso. De los resultados, 60°C a 10 minutos de tiempo de remojo es lo adecuado. Ya que a temperaturas entre 60-70°C, ocasiona que la quinua comience a gelatinizarse, causando pérdidas prematuras de los nutrientes [31].

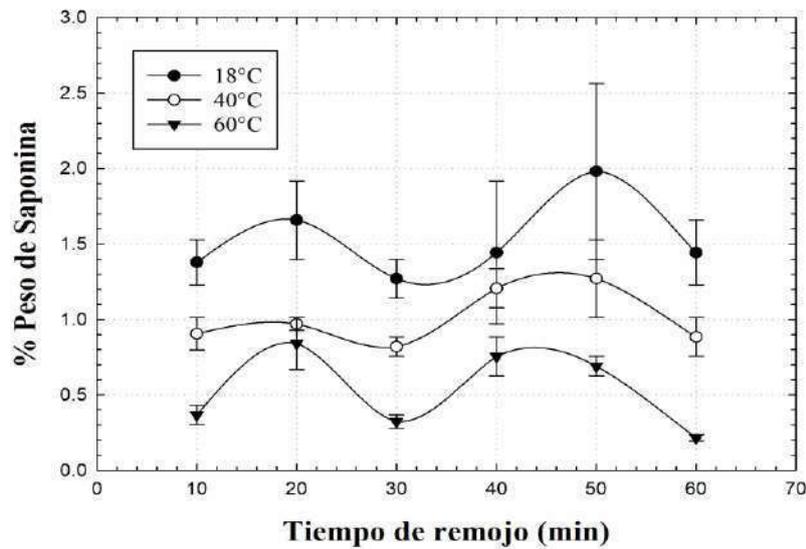


Figura 21: Influencia del remojo y temperatura del agua cruda en el lavado de quinua.

### 4.3 Resumen

En resumen, se logró reducir la saponina de la variedad de quinua Amarilla Marangani de 7% a  $0,36 \pm 0,13\%$  en la configuración de 10 minutos en reposo a 60°C de temperatura del agua, con una relación de mezcla agua-quinua de 1/1, no obstante, los rangos óptimos de calidad según la norma NTP 011.460:2016 indica un máximo de saponina apto para el consumo de 0,11%. Si bien no podemos aumentar el tiempo de remojo y la temperatura, la otra opción sería aumentar la interacción entre granos que garantice la extracción de la saponina por medio de la fricción entre partícula-partícula, es por esto que, en el siguiente capítulo se analizarán los parámetros que influyen en generar mayor interacción entre granos, logrando reducir el porcentaje de saponina.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN RECIPIENTES CERRADOS

En este capítulo, se detallan los resultados obtenidos con respecto a los parámetros que influyen en la formación de un flujo generado por el giro del tambor, con el objetivo de incrementar la interacción entre granos. Primero, se determinaron la influencia que genera las revoluciones del tambor hacia la concentración de la mezcla agua/quinua, seguidamente usando el método de PIV se midió la velocidad de la concentración de la mezcla. Segundo, se estudiaron la influencia de la longitud de las paletas y su relación con la velocidad angular (rpm). La Tabla 3 muestra la matriz experimental con los parámetros a evaluar. Según las pruebas preliminares  $90^\circ$  es el ángulo de ataque adecuado de las paletas.

rpm Tambor	Longitud de paletas (mm)				
	10	20	30	40	50
13 (1.36 rad/s)	x	x	x	x	x
40 (4.28 rad/s)	x	x	x	x	x
60 (6.28 rad/s)	x	x	x	x	x
80 (8.37 rad/s)	x	x	x	x	x

Tabla 3: Matriz experimental de la relación de las rpm del tambor y la longitud de paletas.

#### 5.1 Influencia de las rpm al flujo

La reología del sistema agua/quinua, cuya relación es 1:1, se considera una mezcla de alta concentración, debido a ello, se requiere de un impulso externo que mantenga en suspensión las partículas, para ello, se usó el prototipo de lavadora de quinua con paletas de 10 mm. Los resultados del campo vectorial de velocidades para tres rpm's se muestran en la Figura 22.

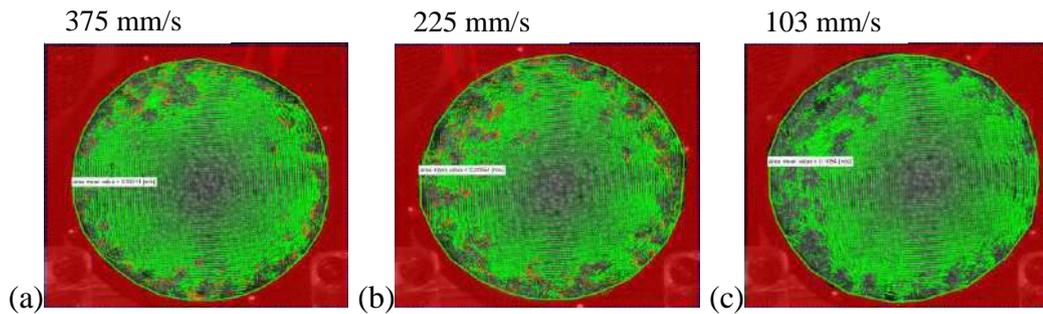


Figura 22: Distribución del vector de velocidades y las velocidades promedio de las partículas (a) 60 rpm, (b) 40 rpm y (c) 13 rpm.

El aumento en la velocidad angular, provoca una mayor velocidad tangencial consecuentemente, aumentando la velocidad promedio de las partículas, así como se muestra en la Figura 23; es evidente que la velocidad promedio de las partículas no coincide con la velocidad de la pared del tambor, esto se debe a que, los granos de quinua no están en contacto con la pared del tambor, debido a que, tienen una capa de lubricación de líquido presente [32]. Sin embargo, a bajas velocidades angulares, es muy similar las velocidades. Por otro lado, se puede asumir en algunos casos, que la ecuación  $\omega r_c$  da es una estimación razonable de la velocidad promedio, característica de los granos de quinua ( $r_c$ = radio interno del tambor).

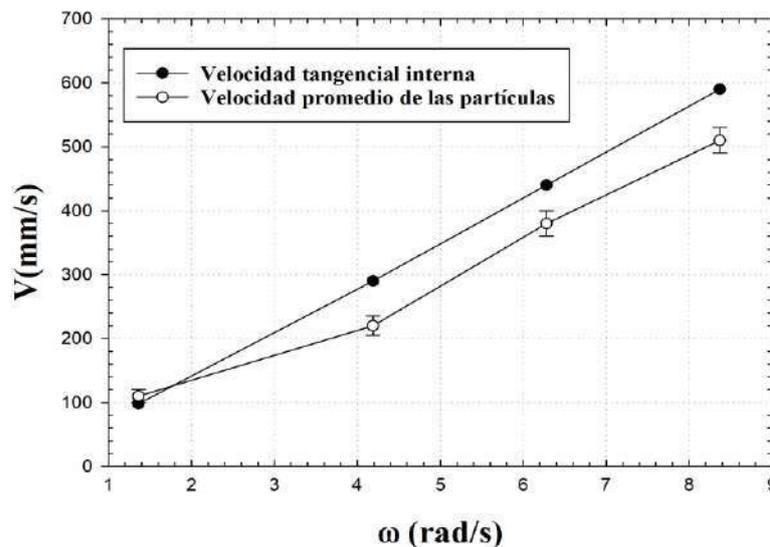


Figura 23: Influencia de la velocidad angular del tambor hacia los granos de quinua.

## 5.2 Influencia de la longitud de las paletas en el flujo

La Figura 24, muestra el comportamiento del flujo, sometido a diferentes longitudes de paletas a 80 rpm; a medida que las longitudes de las paletas aumentan, el flujo cambia, debido al cambio en el área de agitación, de esta manera aumenta la velocidad como también el nivel de caos.

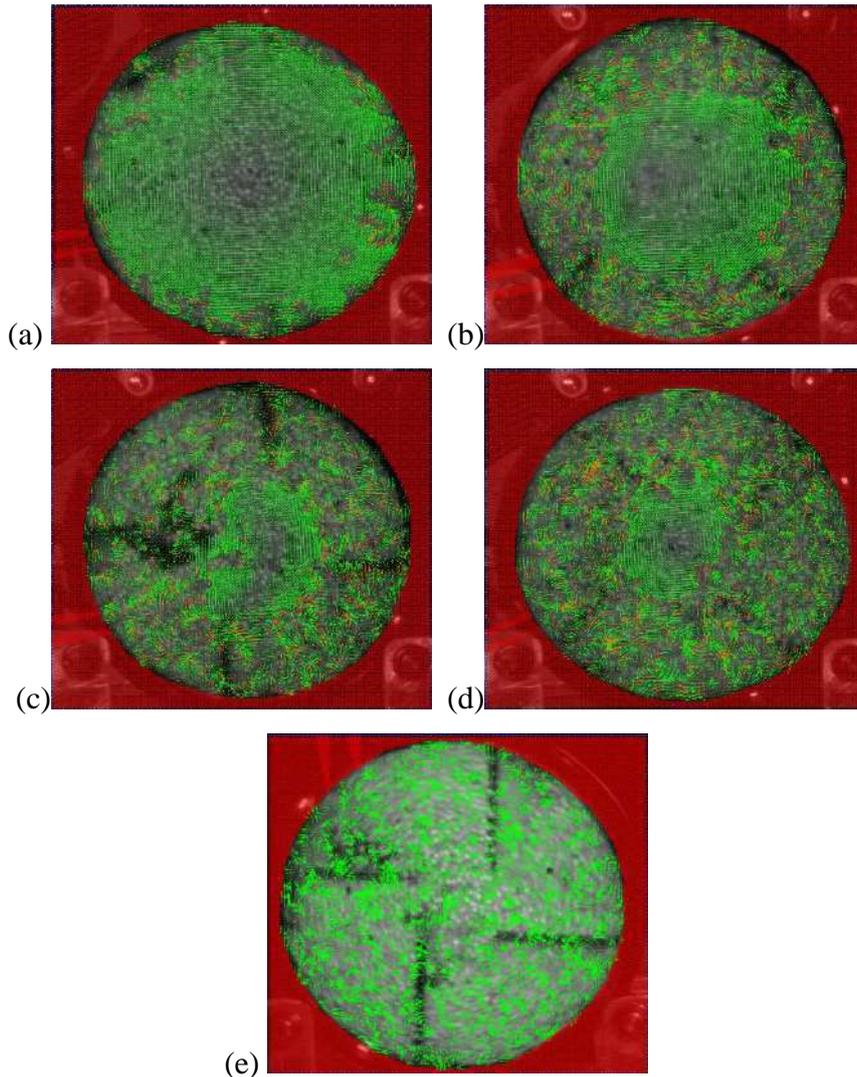


Figura 24: (a) flujo con paleta de 10 mm, (b) flujo con paleta de 20 mm, (c) flujo con paleta de 30 mm, (d) flujo con paleta 40 mm, (e) flujo con paleta a 50 mm.

La Figura 25, muestra las velocidades promedio de las partículas como función de la velocidad angular. En todos los casos se observa un incremento progresivo con

respecto al aumento de las longitudes de las paletas hasta 20% a una velocidad angular de 8,26 rad/s (80 rpm), esto se debe a que, al aumentar la velocidad de rotación de tambor, logra que las partículas tengan mayor velocidad, consecuencia de la formación delgada de la capa límite que se produce en la superficie de las paletas [33], además, el aumento del tamaño de paletas, genera un aumento en la longitud de la capa límite, provocando de esta manera aumentar la interacción entre granos, lo cual es ideal para procesos de lavado, desbarbado, mezclado, entre otros [34]. Sin embargo, al aumentar excesivamente la longitud de las paletas, estas generaran la formación de cámaras (cuatro) reduciendo la interacción entre partículas.

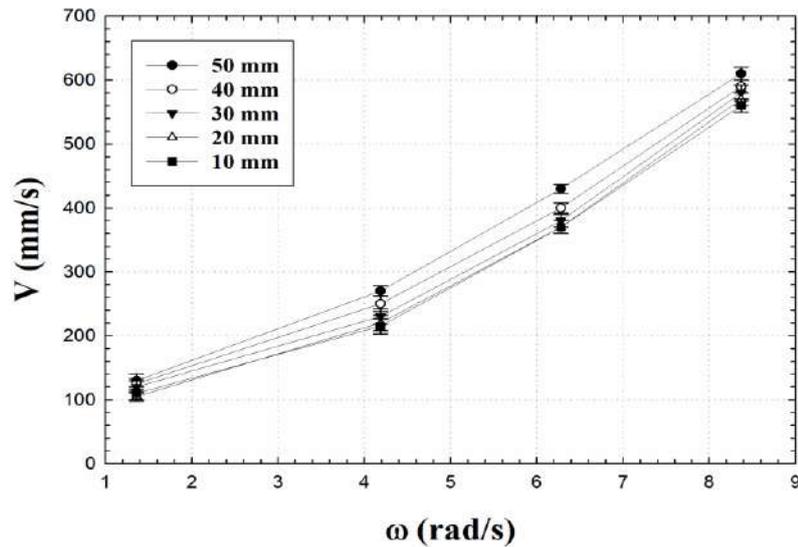


Figura 25: Influencia de la longitud de las paletas, como función de la velocidad angular.

Por otro lado, para evitar la sedimentación o segregación es importante mantener altas velocidades, se recomienda velocidades promedio superiores a 100 mm/s [16], el cual se obtiene en este estudio para todos los casos.

### 5.3 Número de Reynolds del sistema

Según la definición de la mecánica de los fluidos, el número de Reynolds es un parámetro adimensional que caracteriza el comportamiento de un fluido [18]. Para recipientes que tienen la función de mezclado, los flujos característicos son flujos inversos/reciprocante  $Re < 10$ , flujo laminar  $\sim 10$ , flujo en transición  $100 < Re < 10^4$  [35]. De

los resultados obtenidos de velocidad y usando la ecuación 10 [32] [36], se determinó el número de Reynolds en función de la velocidad angular del tambor.

$$Re = \frac{\omega r_c L}{\nu} \quad (8)$$

Siendo  $\nu$  la viscosidad cinemática de la mezcla,  $\omega$  la velocidad angular del tambor,  $L$  longitud de paleta y  $r_c$  radio interno del tambor. Para este análisis se consideró que la viscosidad dinámica de la mezcla entre agua y quinua es de 22.5 C.P., y su densidad es de  $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  [37].

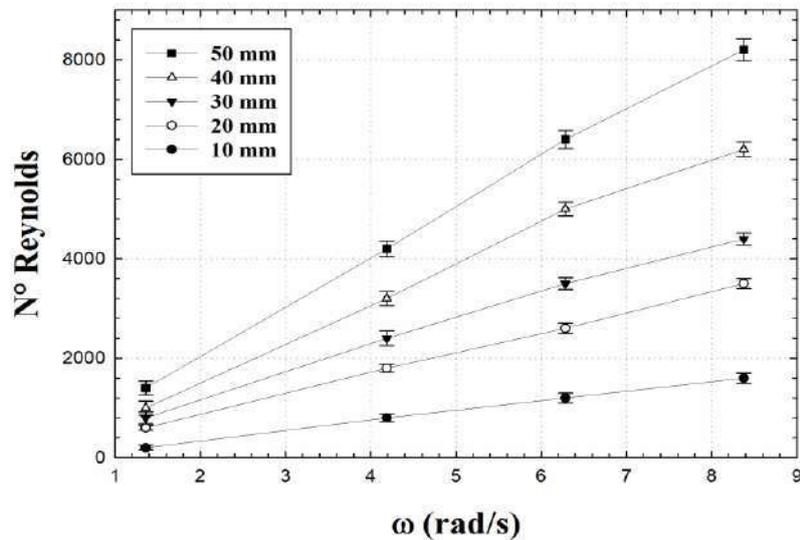


Figura 26: Nº de Reynolds en función de la velocidad angular.

La Figura 26, muestra los valores de número de Reynolds para las diferentes configuraciones experimentales descritas en la Tabla 3. De los resultados se observa que todos los valores de número de Reynolds determinados se encuentran en régimen de transición. Por otro lado, algunos autores definen dos áreas de régimen transitorio, siendo el de menor Reynolds el “parcialmente caótico” y el de mayor Reynolds el “doublet” [32] [38]. según lo estimado, a mayores longitudes de las paletas, el número de Reynolds aumenta, de esta manera se aumenta el nivel del caos, conveniente para sistemas de lavado.

#### 5.4 Caracterización de los vórtices.

La forma y característica de los vórtices vienen a ser parámetros que determinan una buena interacción partícula-partícula, conveniente para este estudio, según lo observado en el campo vectorial de velocidades, se identificaron dos tipos de vórtices claramente localizados. Las Figuras 27 y 28, muestran dos tipos de vórtices formados por el campo vectorial de las gradientes de velocidad. Los vórtices de geometría elíptica (Figura 27), se forman por el cambio de la gradiente de velocidad en la superficie de las paletas para luego dirigirse hacia el centro, una característica de estos vórtices es su punto de estancamiento que se encuentra en el centro del vórtice donde el campo de velocidad es o se aproxima a cero [21]; este vórtice, al llegar al centro choca con otros vórtices, formando la geometría de punto hiperbólico (Figura 28), cuyo punto de estancamiento se presenta en la zona de mayor esfuerzo, es decir, en la zona donde los campos de velocidad son mayores [21]. Por otro lado, el número de vórtices es muy dependiente tanto de la velocidad angular y la longitud de las paletas.

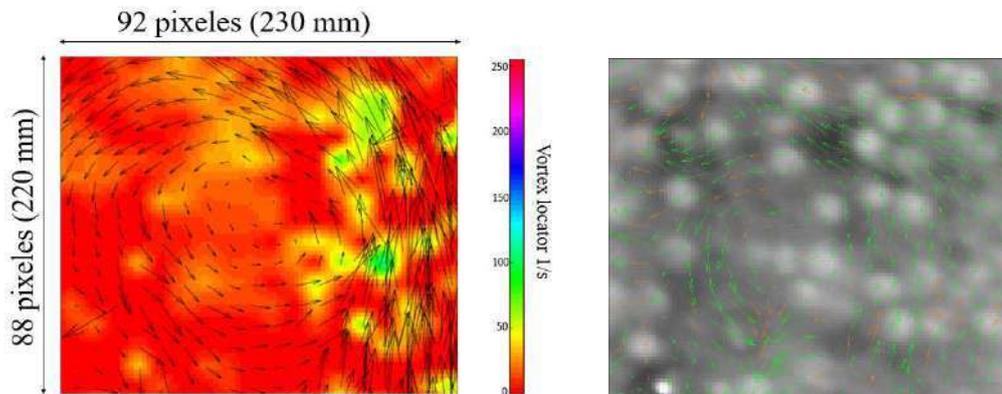


Figura 27: Puntos elíptico, formado por el campo vectorial de la gradiente de velocidad en la superficie de las paletas (50 mm long. paleta a 60 rpm).

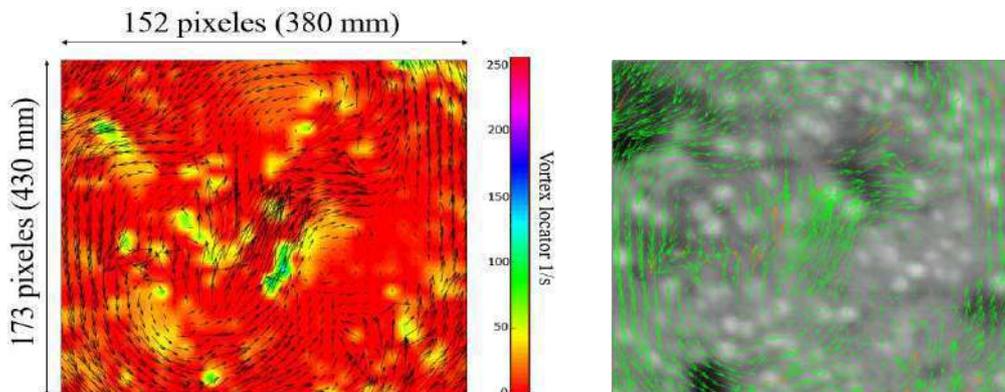


Figura 28: Punto hiperbólico, formado por el campo vectorial, consecuencia del choque entre 4 vórtices (50 mm long. paleta a 60 rpm).

## 5.5 Formación de vórtices

La Figura 29, muestra el número de vórtices generados en función al número de Reynolds para cada longitud de paleta. Se observa que la configuración experimental de 50 mm de longitud de paleta a 60 rpm genera la mayor cantidad de vórtices (~79 vórtices) en un corto periodo de tiempo (~0,106 segundos), producto del aumento del nivel de caos, logrando una mayor interacción partícula-partícula ideal para procesos de lavado por agitación. Además, se ha encontrado que la relación entre el número de Reynolds y la formación de vórtices no es lineal, por lo que, es necesario establecer un límite máximo de la velocidad angular en función al número de vórtices.

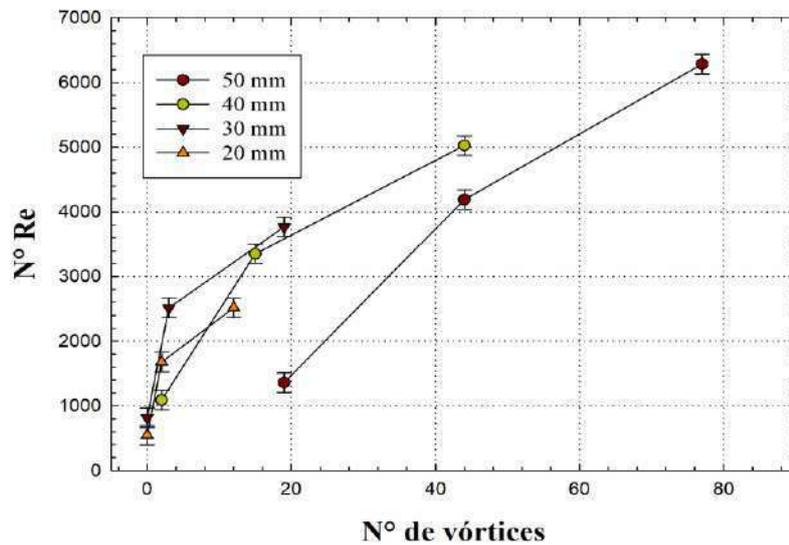


Figura 29: Formación de vórtices en función del número de Reynolds, en un tiempo de 0,106 segundos.

## 5.6 Límite máximo de velocidad angular

El número de vórtices como función de la velocidad angular se muestran en la Figura 30. Se observa que la máxima formación de vórtices se produce a 60 rpm (6.28 rad/s), a mayores velocidades la inercia combinada con la aceleración normal sobrepasa el efecto de la gravedad. por ello los granos de quinua quedan suspendidos en la pared, reduciendo la interacción entre partículas, de esta manera prácticamente reduce a cero el número de vórtices [39].

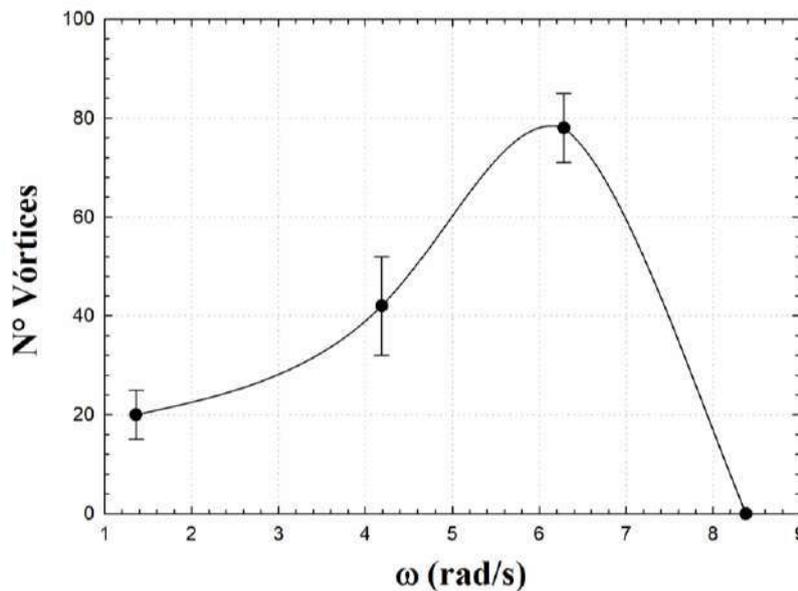


Figura 30: Formación de vórtices producto de la velocidad angular del tambor (50 mm long. Paleta)

La caracterización del comportamiento del flujo en recipientes cerrados se realizó para un prototipo característico; sin embargo, para que estos valores puedan ser aplicados en sistemas de mayor capacidad es necesario proponer una ecuación de similitud, para ello se utilizó el análisis dimensional, que a continuación se detalla.

## 5.7 Análisis adimensional

El análisis adimensional consiste en el estudio de las variables físicas que influyen en el cálculo de los números adimensionales, tales como el número de Reynolds y el número de Potencia, entre otros. En textos de mecánica de los fluidos, las variables físicas para algunos sistemas comunes ya son conocidos con ecuaciones estandarizadas, sin embargo, para sistemas solido-líquido en recipientes cerrados, solamente se ha abordado en trabajos aislados y no de forma global [39]. Para el caso de la lavadora de quinua, es importante que el fluido mantenga su forma caótica, consiguiendo que los granos permanezcan en suspensión todo el tiempo, aumentando el contacto entre ellos; además, se requiere de una potencia que consiga generar y mantener la velocidad angular que produzca el tipo de caos ya establecido. Por ello, los números adimensionales a analizar son el número de Reynolds y el número de Potencia.

### 5.7.1 Ecuación adimensional del número Reynolds

Las magnitudes físicas que influyen en la formación del fluido son la longitud de las paletas, la viscosidad cinemática de la mezcla, la densidad de la mezcla y las rpm del tambor, estas magnitudes determinan la ecuación adimensional ( $\pi_1$ ).

$$f\pi_1(\rho, L, \mu, n) \quad (9)$$

A continuación, en la Tabla 4, se muestran las magnitudes físicas que conforman la ecuación en funciones de la masa, longitud y tiempo (M, L, T).

Magnitud Física	Símbolo	M	L	T
Densidad ( $\rho$ )	$\rho$	1	-3	
paleta (L)	L		1	
Viscosidad(Pa.s)	$\mu$	1	-1	-1
Rotación (1/s)	n			-1

Tabla 4: Magnitudes físicas que conforman la ecuación  $\pi_1$ .

Luego, tenemos la ecuación en función de los símbolos.

$$\pi_1 = \mu[\rho]^a[L]^b[n]^c = M^0L^0T^0 \quad (10)$$

Representando los símbolos en las magnitudes que los conforman.

$$\frac{M}{LT} \left[ \frac{M}{L^3} \right]^a [L]^b \left[ \frac{1}{T} \right]^c = M^0L^0T^0 \quad (11)$$

Finalmente, la ecuación adimensional  $\pi_1$ , se representa de la siguiente manera:

$$\pi_1 = \frac{\mu}{L^2\rho n} \text{ Número adimensional de Reynolds} \quad (12)$$

### 5.7.2 Ecuación adimensional del número de potencia

El número de Reynolds caracteriza el comportamiento de un flujo (“parcialmente caótico y doublet”) durante todo el proceso de lavado, por lo que, se requiere de una energía necesaria que impulse y mantenga la velocidad angular requerida para generar el tipo de flujo mencionado, debido a esto, la ecuación adimensional estará en función del volumen, la potencia, la densidad de la mezcla y viscosidad de la mezcla.

$$f\pi_2(\rho, V, n, P) \quad (13)$$

A continuación, en la Tabla 5, se muestran las magnitudes que conforman la ecuación en funciones de la masa, longitud y tiempo (M, L, T).

Magnitud Física	Símbolo	M	L	T
Densidad ( $\rho$ )	$\rho$	1	-3	
Volumen ( $m^3$ )	V		3	
Rotación (1/s)	n			-1
Potencia (P)	W	1	2	-3

Tabla 5: Magnitudes físicas que conforman la ecuación  $\pi_2$ .

Luego, tenemos la ecuación en función de los símbolos.

$$\pi_2 = [W][\rho]^a[V]^b[n]^c = M^0L^0T^0 \quad (14)$$

Representando los símbolos en las magnitudes que los conforman.

$$\left[\frac{ML^2}{T^3}\right] \left[\frac{M}{L^3}\right]^a [L^3]^b \left[\frac{1}{T}\right]^c = M^0L^0T^0 \quad (15)$$

Finalmente, la ecuación adimensional  $\pi_2$ , se representa de la siguiente manera:

$$\pi_2 = \frac{P}{V^3 \rho n^3} \quad \text{Número adimensional de la Potencia} \quad (16)$$

Mediante la multiplicación de los criterios adimensionales, se obtiene un tercer número adimensional ( $\pi_3$ ), que engloba el número de Reynolds y de Potencia [40] [41].

$$\pi_3 = \pi_1 \cdot \pi_2 = \frac{\mu P}{V_D^{\frac{5}{3}} \rho^2 n^4 D^2} \quad (17)$$

Iguualamos los términos ( $\pi_{\text{diseño}} = \pi_{\text{prototipo}}$ ):

$$\frac{\mu P_D}{V_D^{\frac{5}{3}} \rho^2 n_D^4 D_D^2} = \frac{\mu P_P}{V_P^{\frac{5}{3}} \rho^2 n_P^4 D_P^2} \quad (18)$$

Siendo ( $\rho$  y  $\mu$ ) constantes, tenemos:

$$\frac{P_D}{V_D^{\frac{5}{3}} L_D^2 n_D^4} = \frac{P_P}{V_P^{\frac{5}{3}} L_P^2 n_P^4} \quad (19)$$

Como  $V = \frac{\pi D^2}{4} \ell$ , tenemos:

$$P_D = \left(\frac{L_D}{L_P}\right)^2 \left(\frac{D_D}{D_P}\right)^{10/3} \left(\frac{\ell_D}{\ell_P}\right)^{5/3} \left(\frac{n_D}{n_P}\right)^4 P_P \quad (20)$$

Con ecuación 22, se calcula la potencia que se necesita para impulsar un tambor de mayor capacidad, manteniendo el flujo en estado caótico durante todo el proceso de lavado. Esta ecuación relaciona la longitud entre las paletas de diseño y del prototipo  $\left(\frac{L_D}{L_P}\right)$ , diámetro de diseño del tambor y del prototipo  $\left(\frac{D_D}{D_P}\right)$ , longitud de diseño del tambor y del prototipo  $\left(\frac{\ell_D}{\ell_P}\right)$ , finalmente la velocidad angular de diseño y del prototipo  $\left(\frac{n_D}{n_P}\right)$ .

## 5.8 Resumen

Se evaluaron los parámetros de lavado, encontrando que el tamaño de paleta de 50 mm a 60 rpm genera el mayor número de vórtices, con lo cual, los granos de quinua tendrán mayor interacción entre ellos, logrando reducir el porcentaje de saponina en los granos de quinua. A continuación, mediante la norma de diseño VDI-2225, se evaluarán 4 propuestas de diseño de lavadora de quinua.

## CAPÍTULO VI

### SELECCIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO

Para la selección de una propuesta de diseño, se evaluaron cuatro diferentes propuestas en base a la norma de diseño VDI2225; primero, se detalla una lista de exigencias que deberán cumplir las propuestas de diseño, luego se realizó un análisis técnico y económico en base a la lista de exigencias; finalmente, se obtuvo los valores de cada diseño propuesto y se eligió el diseño que cumpla mejor los requerimientos.

#### 6.1 Lista de exigencias

La siguiente lista de exigencias (ver Tabla 6), fue desarrollada siguiendo las nociones del estado del arte. La lista contiene una serie de exigencias y características que deberá cumplir la máquina para un correcto funcionamiento y diseño [42].

LISTA DE EXIGENCIAS			REVISADO: S.CH.M.
Proyecto: MAQUINA LAVADORA DE QUINUA DE 10 kg			
n.º	Deseo ó Exigencia	DESCRIPCIÓN	Responsable
1	E	<b>FUNCIÓN PRINCIPAL:</b> Lavar la quinua para el consumo, según NTP 011.460:2016	L.C.E.
2	E	<b>GEOMETRIA:</b> Facil armado, con componentes fáciles de hallar y sobre todo que no dañe los granos de quinua.	L.C.E.
3	E	<b>TORQUE:</b> El torque que se entrega debe ser suficiente para que se produzca la mayor interacción entre los granos de quinua.	L.C.E.
4	E	<b>MATERIAL:</b> El flujo de material son los granos de quinua mezclados con agua cruda a temperatura ambiente. A la salida del proceso de lavado, el grano de quinua tomará un color mas claro (un indicador del correcto lavado).	L.C.E.
5	D	<b>CINEMÁTICA:</b> El proceso de lavado debe ser rapido.	L.C.E.
6	E	<b>FABRICACIÓN:</b> La fabricación y ensamble de la máquina debe ser fácil. Los procesos de manufactura que se realizarpan podran ser llevados a cabo en UTEC garage y en los talleres de TECSUP.	L.C.E.
7	E	<b>SEGURIDAD:</b> El diseño no pondrá en peligro al usuario bajo ninguna circunstancia fisica ó emocional, además, el equipo debe ser amigable con el medio ambiente que se encuentre.	L.C.E.
8	E	<b>ERGONOMIA:</b> El manejo del equipo debe ser sencillo, su estructura confiable y ligero.	L.C.E.
9	E	<b>MONTAJE:</b> El montaje del equipo debe ser fácil y rapido, no debe presentar complicaciones durante el proceso, de la misma manera, el desmontaje, para su uso en diferentes lugares.	L.C.E.
10	E	<b>MANTENIMIENTO:</b> El mantenimiento debe ser factible tanto en tiempo como en costo. Los componentes del equipo deben ser fácil de conseguir en el medio local.	L.C.E.
11	E	<b>COSTO:</b> El precio de diseño y fabricación no debe exceder a los 500 nuevos soles.	L.C.E.

Tabla 6: lista de exigencias para la lavadora de quinua de capacidad de 10 kg.

## 6.2 Estructura de funciones

La función total de la máquina lavadora de quinua puede representarse en forma de una caja negra, donde se tienen en cuenta tres magnitudes de entrada y salida [43] (ver Figura 32).

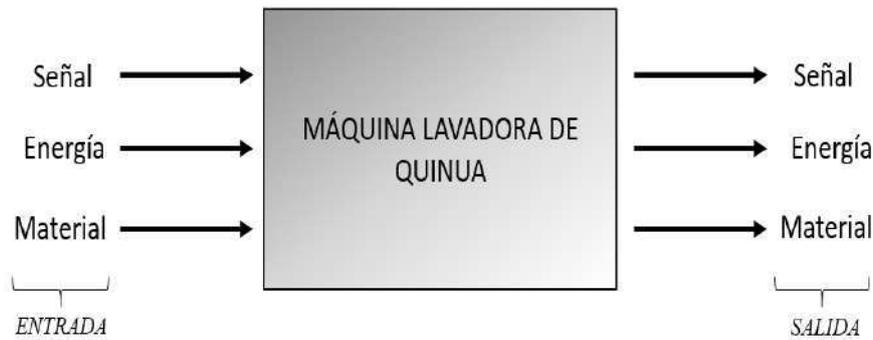


Figura 31: Caja Negra

### ✓ Entradas

- Señal : Señal del tipo visual para inicio del proceso de lavado.
- Energía : Energía mecánica, fuerza eléctrica, motriz o humana.
- Material : Quinua después del pre-lavado.

### ✓ Salidas

- Señal : Tiempo establecido para el final del proceso de lavado.
- Energía : Energía mecánica, ruido, calor y vibraciones.
- Material : Quinua lavada.

## 6.3 Representación de la estructura de funciones.

La estructura de funciones detalla los pasos que se realiza después del pre-lavado. Estos pasos consisten en verter la mezcla al tambor en relación 1:1, luego sellar el tambor y dar el impulso para el lavado; finalmente, sacar la tapa para separar la quinua lavada del residuo de saponina. A continuación, se muestran dos alternativas de la fuente de energía que impulsa el giro del tambor.

**6.3.1 Alternativa 1:** El mecanismo debe lavado será impulsado por energía convencional.

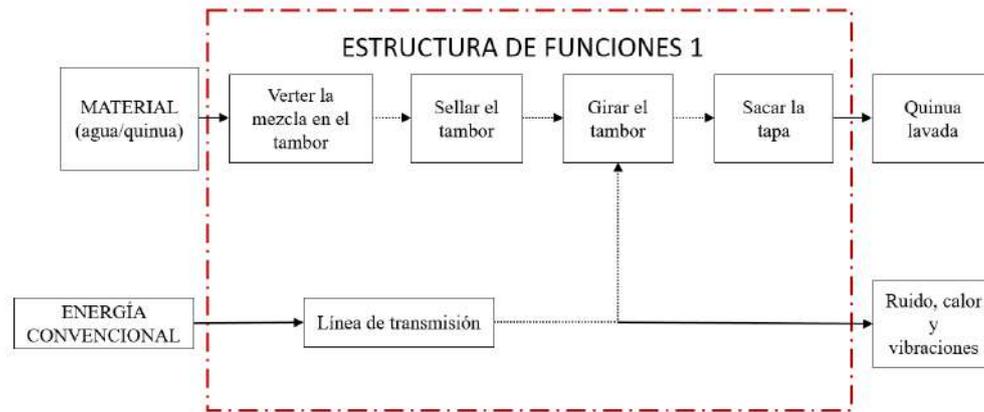


Figura 32: Alternativa de solución N°1

**6.3.2 Alternativa 2:** El mecanismo de lavado será impulsado por energía no convencional.

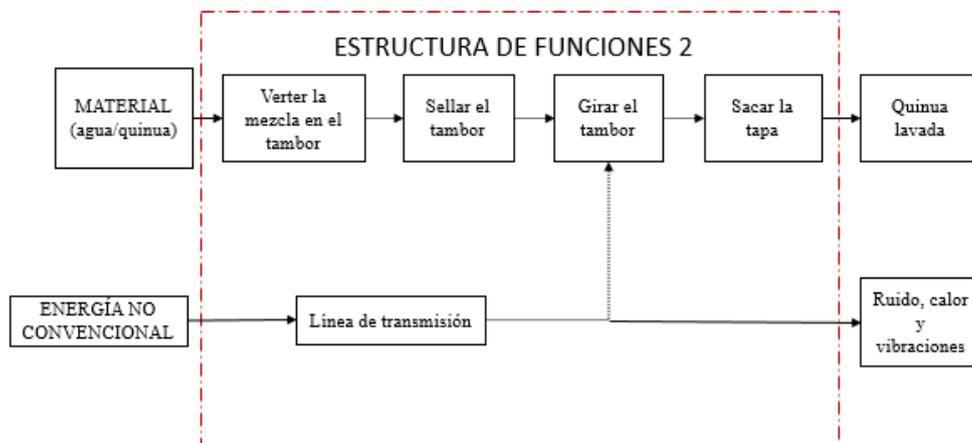


Figura 33: Alternativa de solución N°2

## 6.4 Elección de la estructura de funciones

El uso de energía convencional implica inversión adicional, además de los efectos negativos hacia medio ambiente, esto nos lleva a proponer el uso de otras fuentes de energía conocida como energía no convencional siendo una alternativa valiosa que puede ser aprovechada para nuestro beneficio [44]. Existen diferentes tipos de energía no convenciones como la eólica, solar, marítima, entre otros. También están las que son

impulsadas por el ser humano, con una buena aceptación en lugares donde no se cuenta con energía eléctrica. Para este estudio, el uso de este tipo de energía en campos de cultivo, donde la energía eléctrica no es disponible, es una alternativa óptima, puesto que, las personas no dependerán de una fuente de energía que demande costos de operación, sino que, ellos mismos pueden hacerse cargo. Finalmente, se toma la alternativa 2 como solución; puesto que, propone una fuente de energía amigable para el medio ambiente. No obstante, el uso de un motor eléctrico también podría ser factible para el impulso de la lavadora de quinua.

## 6.5 Matriz morfológica

La Tabla 7, presenta una forma discursiva para llegar a las soluciones con la ayuda de un esquema ordenado, de esta forma se pretende construir un sistema de soluciones completo para el sistema dado [45].

FUNCIONES				
VERTER LA MEZCLA		 bidón	 Recipiente	 faja transportadora
SELLAR EL TAMBOR		 Tapa roscada	 Suncho	 Empaques
LINEA DE TRANSMISIÓN	POTENCIA	 Pedal	 Manivela	 Motor eléctrico
	TRANSMITIR POTENCIA	 Faja	 cadena	 engranajes
	GIRAR EL TAMBOR	 Sprocket	 Bicicleta	
SACAR TAPA		 mano		



Concepto solución 1    Concepto solución 2    Concepto solución 3    Concepto solución 4

Tabla 7: Matriz morfológica de las funciones de la máquina

## 6.6 Concepto solución

De la matriz morfológica se desprenden 4 conceptos solución que se presentará a continuación:

### 6.6.1 Concepto solución 1:

El primer concepto solución consiste en la transmisión de potencia por medio de una manivela (ver Figura 35), dos sprockets y una cadena. la manivela estará contacto a un sprocket que a su vez impulsa una cadena, en el otro extremo de la cadena está el segundo sprocket conectado al tambor, el giro de la manivela logrará que el tambor gire.

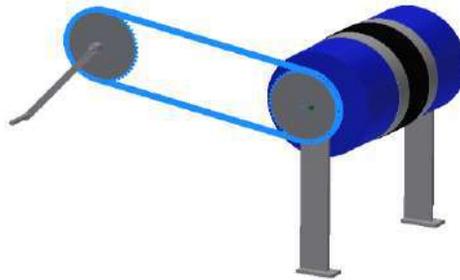


Figura 34: Tambor giratorio impulsado por una manivela.

### 6.6.2 Concepto solución 2:

El segundo concepto solución consiste en la transmisión de potencia por medio de un motor eléctrico, dos sprockets y una cadena. el motor eléctrico estará conectado a un sprocket que a su vez impulsa una cadena (ver Figura 36), en el otro extremo de la cadena está el segundo sprocket conectado al tambor, el giro del motor eléctrico logrará que el tambor gire.

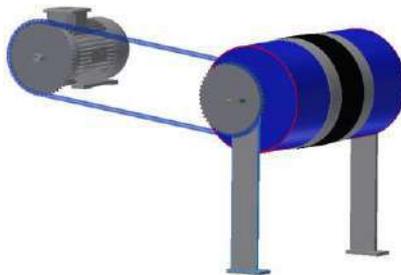


Figura 35: Tambor giratorio impulsado por un motor eléctrico.

### 6.6.3 Concepto solución 3:

El tercer concepto solución consiste en la transmisión de potencia por medio de una bicicleta (ver Figura 37). La bicicleta se acondiciona para que al momento de pedalear pueda mover el tambor. Este equipo se mantendría en estado estacionario.



Figura 36: tambor giratorio impulsado por una bicicleta estacionaria.

### 6.6.4 Concepto solución 4:

El cuarto concepto solución consiste en la transmisión de potencia por medio de una bicicleta, a diferencia del concepto solución 3, esta alternativa propone girar el tambor por medio del contacto entre la rueda posterior de la bicicleta, sin la necesidad de modificar la estructura de la bicicleta, como se aprecia en la Figura 38.



Figura 37: Tambor giratorio, impulsado por una bicicleta, con la opción de desplazamiento.

## 6.7 Evaluación de los conceptos de solución:

Siguiendo la metodología establecida para el diseño, se procede a hacer un análisis técnico-económico de las propuestas, para así determinar la más apropiada para la aplicación. Para esto se muestran las tablas que corresponden a las evaluaciones técnica

(ver Tabla 8) y económica (ver Tabla 9) respectivamente. El puntaje otorgado a cada criterio de evaluación está en función a la lista de exigencias presentadas en la Tabla 6; finalmente en la Figura 38, se mostrará la solución técnico-económica más apropiada [45].

EVALUACIÓN DE CONCEPTOS DE SOLUCIÓN												
Valor Técnico (x)												
p: Puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)												
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal)												
g: Peso ponderado, está en función de los criterios de evaluación (1:4)												
Criterios de Evaluación para Diseños en Fase de Concepto o Proyectos												
Variante de concepto/Proyecto		Solución 1			Solución 2		Solución 3		Solución 4		Solución Ideal	
n°	Criterio de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Simplicidad de diseño	4	3	12	1	4	2	8	2	8	4	16
2	Seguridad	2	1	2	1	2	2	4	2	4	4	8
3	Menor peso	3	3	9	1	3	2	6	2	6	4	12
4	Menor tamaño	3	3	9	1	3	2	6	2	6	4	12
5	Rapidez	2	1	2	2	4	1	2	2	4	4	8
6	Facilidad de manejo	2	2	4	1	2	2	4	2	4	4	8
7	Rendimiento del torque	3	1	3	3	9	3	9	3	9	4	12
8	Simplicidad de transmisión	2	3	6	2	4	2	4	3	6	4	8
9	Facilidad de montaje	3	1	3	1	3	2	6	3	9	4	12
10	Fácil el proceso de manufactura	2	2	4	1	2	2	4	2	4	4	8
11	Fácil adquisición de repuestos	2	2	4	1	2	3	6	3	6	4	8
12	Fácil mantenimiento	3	3	9	1	3	3	9	3	9	4	12
	Suma de puntaje ( $\Sigma p$ y $\Sigma gp$ )		25	67	16	41	26	68	29	75	48	124
	$\bar{X}_i$		0,52	0,54	0,33	0,33	0,54	0,55	0,60	0,60	1	1

Tabla 8: Evaluación técnica del concepto solución.

EVALUACIÓN DE CONCEPTOS DE SOLUCIÓN												
Valor Económico (y)												
p: Puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)												
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal)												
g: Peso ponderado, está en función de los criterios de evaluación (1:4)												
Criterios de Evaluación para Diseños en Fase de Concepto o Proyectos												
Variante de concepto/Proyecto		Solución 1			Solución 2		Solución 3		Solución 4		Solución Ideal	
n°	Criterio de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Simplicidad de diseño	4	3	12	1	4	2	8	2	8	4	16
2	Costo de material	3	3	9	1	3	2	6	2	6	4	12
3	Menor peso	2	2	4	1	2	2	4	2	4	4	8
4	Menor tamaño	3	2	6	1	3	2	6	2	6	4	12
5	costo de operación	2	1	2	1	2	2	4	2	4	4	8
6	Simplicidad de transmisión	2	2	4	2	4	2	4	3	6	4	8
7	Facilidad de montaje	3	1	3	1	3	1	3	3	9	4	12
8	Fácil el proceso de manufactura	2	2	4	2	4	2	4	2	4	4	8
9	Fácil adquisición de repuestos	2	3	6	1	2	3	6	3	6	4	8
10	Fácil mantenimiento	3	3	9	1	3	3	9	3	9	4	12
	Suma de puntaje ( $\Sigma p$ y $\Sigma gp$ )		22	59	12	30	21	54	24	62	40	104
	$\bar{Y}_i$		0,55	0,57	0,30	0,29	0,53	0,52	0,60	0,60	1	1

Tabla 9: Evaluación económica del concepto solución.

Luego de obtener ambas coordenadas representadas por el valor técnico (x) y económico (y), se procede a dibujar una gráfica de toma de decisión donde se representará la solución ideal como una línea de pendiente 1.

## 6.8 Coordenadas cartesianas de los proyectos preliminares

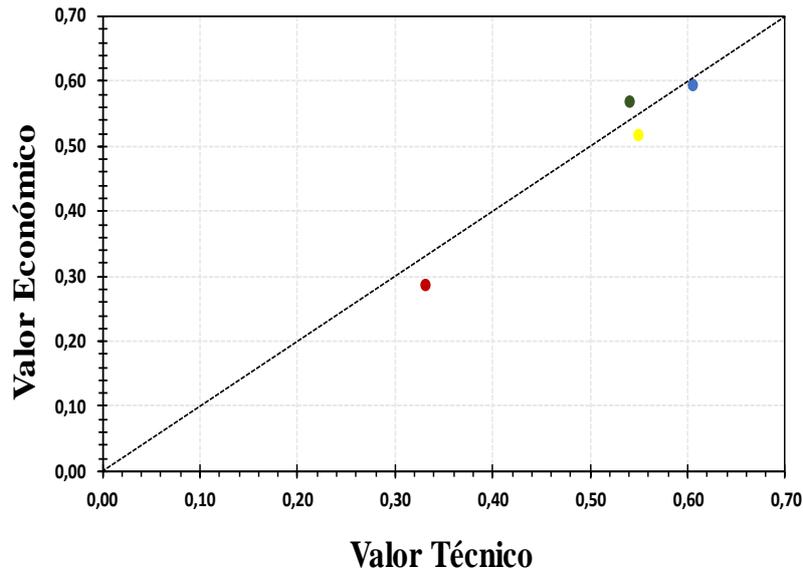


Figura 38: Evaluación técnico - económica

El uso de bicicletas para diversas aplicaciones se ha convertido en una alternativa con impactos sociales favorables. Existe una gran cantidad de equipos que son impulsados por una bicicleta, a continuación, presentamos algunos de los cuales fueron significativos para la realización de la propuesta:

- Richard Hewitt, estudiante de diseño en la Universidad de Sheffield Hallam (Inglaterra), desarrollo una lavadora de ropa, impulsada por una bicicleta y cuyo propósito es comercializarlo en países del África.
- Lisa Tacaronte, estudiante de ingeniería mecánica del MIT, desarrollo un prototipo de bicicleta estacionaria para el lavado de ropa de un orfanato, ubicado en el distrito de Ventanilla, Lima-Perú.
- José Alejandro Gómez, Medellín-Colombia, creo la bici-licuadora, una bicicleta estacionaria que impulsa una licuadora. José, dueño de un restaurante, indico que

debido a los constantes cortes de luz que se producen, decidió crear una licuadora que sea impulsada por una bicicleta.

- Manuel Patrón Codesido, estudiante de la Universidad Carlos III de Madrid-España, Desarrollo una tesis “Caracterización de Bombas, Bici-Bombas de Mecate”, el cual especifica el diseño y construcción de una bomba de agua, impulsada por una bicicleta.

Todas estas modificaciones que se dan a la bicicleta, han llevado a la creación de nuevas propuestas, logrando una variedad enorme de bicimáquinas o también llamadas bicicletas eco-amigables.

## **6.9 Resumen**

El uso de una bicicleta para impulsar la lavadora de quinua es una alternativa ideal para pequeños productores, pues su uso no demanda costos de operación elevados; además, son eco-amigables con el ambiente donde se usa. En efecto, el diseño elegido cumple todos los requerimientos impuestos en la Tabla 6. A continuación, en el siguiente capítulo se analiza la potencia que se requiere para impulsar al tambor (mezcla de agua y quinua) y los esfuerzos que se generan durante el lavado. Finalmente, validar los resultados de la lavadora de quinua construida.

## CAPÍTULO VII

### ANÁLISIS DE DISEÑO Y VALIDACIÓN

Es necesario que antes de fabricar el diseño, se analice mediante métodos analíticos, los esfuerzos que se generan debido al aumento de peso (eje masa de la bicicleta). En primer lugar, calcular la potencia que requiere generar el giro del tambor mediante la ecuación 22, que se encuentra en función del número de Reynolds y el número de Potencia; en segundo lugar, calcular los esfuerzos que se generan durante el proceso de lavado. Finalmente, validar los resultados de lavado con la máquina construida. A continuación, se menciona las partes y funcionamiento que conforman la lavadora de quinua.

#### **7.1 Partes y funcionamiento de la lavadora de quinua.**

El diseño consta de los siguientes componentes (ver Figura 39):

- A. Tambor giratorio
- B. Estructura de soporte
- C. Brazo pivot
- D. Bicicleta montañera estándar
- E. Eje Pívor

El funcionamiento es el siguiente: La estructura de soporte (B) se desplaza hacia atrás, logrando suspender la rueda posterior de la bicicleta (D), luego colocamos el tambor giratorio (A) en contacto con la rueda posterior, dentro del tambor giratorio se coloca la quinua mezclada con agua; a continuación, una persona comenzará a pedalear la bicicleta (D) haciendo que la rueda posterior gire y con ello el tambor (por medio de contacto entre la rueda y el tambor), produciéndose el proceso de mezcla entre el agua y la quinua (interacción quinua-quinua), de esta manera se consigue lavar la quinua (ver Figura 39a).

Después del lavado, el tambor giratorio (A) se desplaza hacia atrás, la estructura de soporte (B) se desplaza hacia adelante, colocando la rueda posterior de la bicicleta en contacto con el suelo, de esta forma, la máquina puede desplazarse hacia otro lugar de cultivo (ver Figura 39b). Por otro lado, es importante calcular los esfuerzos que se presentan durante en lavado de quinua, así como la potencia necesaria para generar la velocidad angular en el tambor.

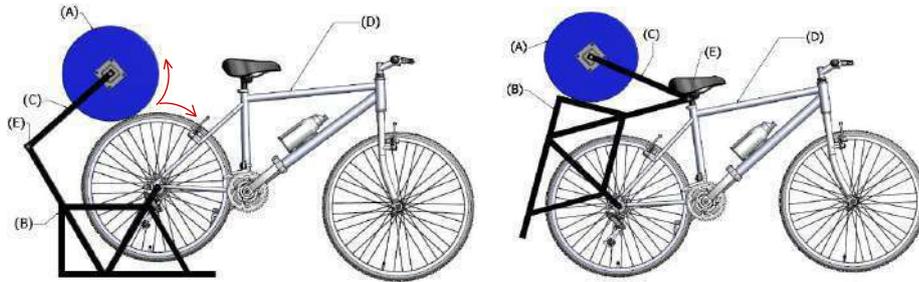


Figura 39: (a) Máquina en posición de lavado, (b) máquina en posición de transporte.

## 7.2 Análisis de potencia y esfuerzos

La potencia requerida para el impulso de la lavadora se obtiene de la ecuación 22, que relaciona las dimensiones de probeta con las dimensiones de diseño (ver Anexo 6,7,8 y 9); esta ecuación relaciona los números adimensionales de Reynolds y de Potencia, logrando caos en el flujo. Por otro lado, el lavado genera la formación de esfuerzos en diferentes partes de la estructura, por ello, se analizan los esfuerzos mediante métodos analíticos [46] [47] de las diferentes partes del diseño. La tabla 10, muestra el resumen de los resultados obtenidos del análisis de la potencia y de los esfuerzos, teniendo como resultado valores mínimos permisibles (diámetro, potencia, Fuerza y soldadura).

Componente a analizar	Método empleado	Resultado	Diseño	Estado	Anexo
Potencia (watt) necesaria para el giro del tambor	Ecuación 22	455,87	$P > 500$	✓	A1
Fuerza (N) de contacto entre el tambor y la	DCL dinámico [47]	148	233,8	✓	A2
Eje masa (pulg)	Diseño de ejes ANSIS B106IM	$\approx 0,568$	$\approx 5/8$	✓	A3
Eje del tambor (pulg)	Diseño de ejes ANSIS B106IM	$\approx 0,548$	$\approx 5/8$	✓	A4
Soldadura de voladizo (pulg)	[46]	0,061	mar-16	✓	A5

Tabla 10: Tabla de resumen de valores mínimos permisibles.

Se sabe que una persona de  $24 \pm 8$  años y  $69,7 \pm 7,3$  kilos, puede producir una potencia mayor a 500 watt, usando una bicicleta [48], entonces, la potencia requerida para mover el mecanismo cumple con el requerimiento, del mismo modo, para el análisis de esfuerzo, se obtuvo valores menores (diámetro, soldadura y fuerza) a los del diseño.

### 7.3 Validación de los parámetros que influyen en el lavado.

Las validaciones se realizaron con la lavadora de quinua construida, para ello, se realizó el proceso de pre-lavado cumpliendo los parámetros de remojo en agua a 10 minutos y  $60^\circ\text{C}$ . Transcurrido ese tiempo, se vertió la quinua mezclada con agua cruda a temperatura ambiente  $19^\circ\text{C}$  al tambor; luego colocándose el tambor en contacto con la rueda posterior, para después dar el impulso al tambor para que este gire, manteniéndolo a una velocidad constante de 60 rpm por un periodo de 20 minutos. Durante el periodo de lavado se tomaron 5 muestras entre 10, 15 y 20 minutos; luego de ellos, se realizó la medición del contenido de saponina (prueba afrosimétrica), obteniendo una curva que descende en relación al tiempo de lavado. Se observa que en 15 minutos se obtiene resultados por debajo del máximo aceptable según la norma NTP 011.460:2016 ( $0,04 \pm 0,03\%$ ), así como se observa en la Figura 40.

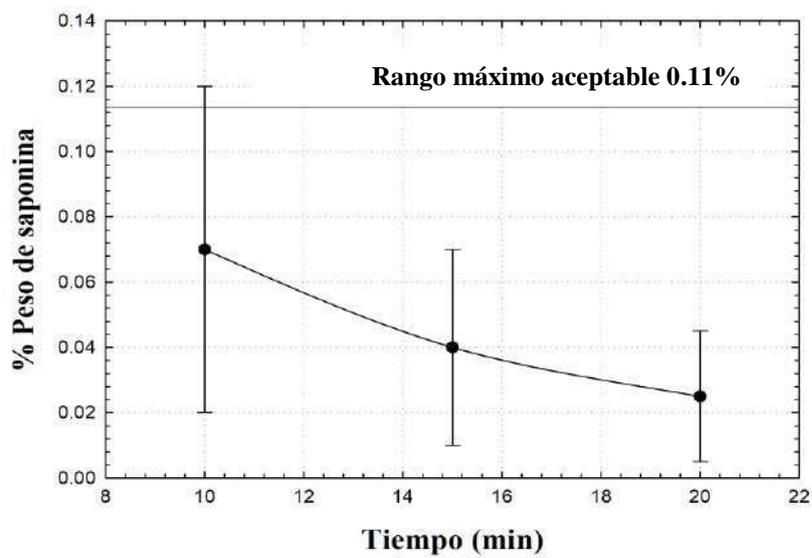


Figura 40: Validación de la máquina lavadora de quinua.

#### 7.4 Resumen

La potencia requerida para dar el movimiento de giro en el diseño, es menor a la potencia generada en el pedaleo de una persona, consiguiendo que los granos de quinua presenten menor porcentaje de saponina establecida por INDECOPI, durante un periodo de lavado de 15 minutos.

## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES.

A continuación, se presenta los resultados finales de las pruebas experimentales, en base a los objetivos propuestos.

1. Se determinó que los parámetros que influyen significativamente el proceso de pre-lavado son la relación agua/quinua de 1:1, la temperatura del agua de remojo a 60°C y el tiempo de remojo de 10 minutos, logrando reducir la saponina de la variedad Amarilla Marangani de 7% a  $0.36 \pm 0.13\%$ .
2. El estudio del flujo durante el proceso de lavado para el sistema líquido-quinua, sometido a movimientos rotatorios (60 rpm de velocidad angular) y con 4 paleta de 50 mm, muestra el comportamiento del flujo en estado “parcialmente caótico y/o doublet”, con un número de Reynolds (~6000) relativamente alto, donde los granos están en interacción constante (partícula/partícula), consecuencia de los vórtices que se forman y chocan entre sí; logrando que el desprendimiento de saponina en los granos de quinua sea mayor. No obstante, si la velocidad angular aumentase (~80 rpm), la formación de vórtices desaparece por completo, debido al aumento de la aceleración normal que sobrepasa el efecto de la gravedad, ocasionando que los granos de quinua queden suspendidos en la pared del tambor, reduciendo la interacción de las partículas.
3. Se logró dimensionar la geometría del tambor y paletas mediante una ecuación que relaciona los números adimensionales de Reynolds y de Potencia, cuya fuerza de transmisión es el contacto entre el tambor y la rueda posterior de una bicicleta

(energía no convencional), teniendo como resultado la reducción de saponina a  $0,04 \pm 0,03\%$ , siendo un valor mucho menor al impuesto por la norma NTP011.460:2016 de 0.11%. Además, el costo de fabricación de la lavadora es de 400 nuevos soles.

## 8.2 RECOMENDACIONES.

Asimismo, se detalla algunas recomendaciones.

1. Durante la configuración experimental, es recomendable usar una fuente de luz externa que aumente la intensidad del objeto en estudio, de esta manera poder aumentar la velocidad de captura de imágenes.
2. Se recomienda cambiar el material del eje masa de las bicicletas que se fabrican en el país, a un acero AISI 4140.
3. Se recomienda usar el electrodo E60 (punto azul), para las uniones por soldadura en la estructura soporte.

## TRABAJOS A FUTURO

1. Calcular las cargas dinámicas que se producen durante el lavado de quinua, hacia la estructura de la bicicleta, mediante métodos de elementos finitos.
2. Es necesario medir el porcentaje de pérdida de nutrientes de los granos de quinua después del proceso de lavado descrita en la tesis.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] León, P. & Zurita, A., "*Quínoa: Un super alimento para Chile y el mundo*". Tierra adentro, 2005, pp. 16-17.
- [2] Tapia, E., "*Cultivos marginados de la región andina*" Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación FAO, 1992, pp. 123-128.
- [3] Romero, C. "*Quinua Peruana, Situación Actual y Perspectivas en el Mercado Nacional e Internacional al 2015*" Dirección general de políticas agrarias, pp. 34-35.
- [4] Cerpa, F., Door, X., Figueroa, M. & Tsuchiya, G., Tesis: "Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta procesadora de cereal extraído de quinua para el mercado de Lima Metropolitana", UNALM, 2005, Lima-Perú.
- [5] Gómez, L. & Egolluz, A., "*Catálogo del Banco de Germoplasma de Quinua*" nº 1, 2011, pp. 10.
- [6] Romero, A., "*Quínoa: Un Super Alimento para Chile y el Mundo*" Tierra Adentro, 2011, pp. 21.
- [7] Suca, F., Tesis: "Competitividad del agro negocio de la quinua". UNALM, 2007, Lima-Perú.
- [8] Granos andinos, Quinua. Determinación del contenido de saponinas por el método de la espuma, Indecopi, Lima, 2016.
- [9] Alandia, G., Irigoyen, J. & Blajos, J. "La quinua: Cultivo Milenario para Contribuir a la Seguridad Alimentaria Mundial", FAO, 2011.
- [10] Repo-Carrasco, R. & Li Hoyos, N., Tesis: "Elaboración y evaluación de alimentos infantiles con base en cultivos andinos. Archivos Latinoamericanos de Nutrición", UNALM, 1993, pp. 168-175.

- [11] Buendía, J., "*Revista técnica agropecuaria 7*", Agrobanco, 2012, pp. 5-6.
- [12] Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., & Kompenhans, J., "Particle image velocimetry: a practical guide", Springer, 2013.
- [13] Adrian, R. J., "Twenty years of particle image velocimetry", *Experiments in fluids*, 39(2), 2005, pp.159-169.
- [14] Rafael C., Gonzalez, Richard E., Woods, & Steven L., Eddins., "Digital Image Processing Using MATLAB®", Gatesmark Publishing., 2009, pp. 19-21.
- [15] Brigham, E. O., & Brigham, E. O., "The fast Fourier transform and its applications.", vol 1, Englewood Cliffs, NJ: prentice Hall, 1988.
- [16] Uhl, V. (Ed.), "Mixing V1: Theory And Practice", Elsevier, 2012.
- [17] Yunus, A. C., & Cimbala, J. M., "Fluid mechanics fundamentals and applications", International Edition, McGraw Hill Publication, 185201, 2013.
- [18] Mott, R. L., "Mecánica de fluidos", Pearson educación, NY, 2006.
- [19] Potter, M. C., & WIGGERT, C., "Mecánica de fluidos", 3ra. Ed, Editorial Thomson, México, 2002.
- [20] Baker, G. L., & Gollub, J. P., "Chaotic dynamics: an introduction", Cambridge University press, 1996.
- [21] Ouellette, N. T., & Gollub, J. P., "Dynamic topology in spatiotemporal chaos," *Physics of Fluids*, 20(6), 064104, 2008.
- [22] Díaz, L. F. H., & Conde, A., "Caos, fluidos y flujos", *Ingeniería e Investigación*, (48), 2001, pp. 29-39.
- [23] Thielicke, W., & Stamhuis, E., "PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB", *Journal of Open Research Software*, 2(1), 2014.

- [24] W. Thielicke, "The flapping of birds", Hamburg, Germany: University of Groningen, 2014.
- [25] Ruiz Morales, A. E., Tesis maestría: "Evaluación del PIV como método de medida en Geotecnia", Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [26] Goldsmith, J., Thesis: "Particle Image Velocimetry and its Applications to Granular Media". Worcester Polytechnic Institute, 2012.
- [27] Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R. & Pinedo, R. "*Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú*", 2013, pp. 50-53.
- [28] Arias, L.B., Tesis: "Determinación del Contenido Protéico en Mutantes de Quinoa (*Chemopodium quinoa wild*) variedad la Molina 89 por Espectroscopia de Transmitancia en el Infrarrojo Cercano". UNALM, 2002, Lima-Perú.
- [29] PADT, G. "*Junta del acuerdo de Cartagena*", UNALM, 1983, Lima-Perú.
- [30] Nauri, S., "Implementation and development of advanced algorithms of LFC-PIV in Stereoscopic PIV systems and its application to flows of industrial interest", 2008.
- [31] Arzapalo, D., Huamán, K., Quispe M. & Espinoza, C., Tesis: "Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinua (*chenopodium quinoa Willd*) Negra Collana, Pasankalla Roja y Blanca Junín", 2014.
- [32] Davidheiser, J. E., Syers, P., Segrè, P. N., & Weeks, E. R., "Complex dynamics of three interacting spheres in a rotating drum. *Physics of fluids*", 22(3), 033305, 2010.
- [33] Yunus, A. C., & Cimbala, J. M., "Fluid mechanics fundamentals and applications". International Edition, McGraw Hill Publication, 185201., 2006, pp. 554-556.
- [34] Tiwari, B., & Cullen, P. J. "Kinematics of flow and mixing mechanisms. *Food Mixing: Principles and Applications*", 21, 2009.

- [35] Rielly, C. D., & Gimbun, J. "8 Computational fluid mixing. In Food Mixing: Principles and Applications". Wiley Blackwell Chichester, UK, 2009, pp. 125-174.
- [36] Freund, J. B., Goetz, J. G., Hill, K. L., & Vermot, J. "Fluid flows and forces in development: functions, features and biophysical principles. Development", 139(7), 2012, pp. 1229-1245.
- [37] Benvenuto, D. Tesis: "Elaboración de una Bebida Proteíca a Base de Quinoa (Chenopidium Quinoa Wild)", UNALM, 1972, Lima-Perú.
- [38] Rice, M. J., "High resolution simulation of laminar and transitional flows in a mixing vessel ", Doctoral dissertation, Virginia Tech, 2011.
- [39] Rodríguez, F., Aguado, J., Calles, J. A., Cañizares, P., López, B., Santos, A., & Serrano, D., "*Ingeniería de la industria alimentaria*". Síntesis, Madrid, 2002.
- [40] Timár, P., "Dimensionless characteristics of centrifugal pump", Chemical Papers-Slovak Academy of Sciences, 59(6B), 500, 2005.
- [41] Szirtes, T., "Applied dimensional analysis and modeling", Butterworth-Heinemann, 2007.
- [42] Barriga, B., "*Métodos de diseño en ingeniería mecánica: Compresión de la solitud*". capítulo 1, PUCP, 2013, Lima-Perú.
- [43] Barriga, B., "*Métodos de diseño en ingeniería mecánica: Estructura de funciones*". capítulo 2, PUCP, 2013, Lima-Perú.
- [44] Khan, B. H., "Non-conventional energy resources", Tata McGraw-Hill Education, 2006.
- [45] Barriga, B., "*Métodos de diseño en ingeniería mecánica: Concepto de solución*" capítulo 3, PUCP, 2013, Lima-Perú.
- [46] Robert, M.L. "Diseño de elementos de máquinas". Editorial Prenticehall Hispanoamérica, México, 2006.

- [47] Hibbeler, R. C., "Ingeniería Mecánica-Dinámica" ,12 ed., 2010.
- [48] Rodger, S. M., Plews, D. J., McQuillan, J., & Driller, M. W., "Evaluation of the Cyclus cycle ergometer and the Stages power meter for measurement of power output in cycling. Journal of Science and Cycling", 5(3), 16, 2016.
- [49] Richards, N., "Bicycle Axle Research", 2010.
- [50] Ashby, M., "Materials Selection in Mechanical Design, Woburn: Butterworth-Heinemann", 1999, pp. 228-230.

## ANEXOS

### Anexo 1: “Cálculo de la Potencia”

En la Tabla 11, se muestran los valores de diseño ya establecidos para una capacidad de lavado de quinua de 10 kilos. Para el cálculo, usaremos la ecuación 20 de la potencia de diseño que se obtuvo en el punto 5.7.

	Símbolo	Prototipo	Diseño
Longitud del tambor (mm)	$\ell$	50	500
Diámetro tambor (mm)	$D$	150	250
Longitud de paleta (mm)	$L$	50	84
Revoluciones (rpm)	$n$	60	60
Potencia (w)	$P$	0.62 w	455,87 w

Tabla 11: Calculo de la potencia para el giro del tambor de diseño.

## Anexo 2: “Análisis de la fuerza de contacto entre el tambor y la rueda”

Durante el lavado, es conveniente que el tambor este en constante contacto con la rueda de la bicicleta, para una transmisión eficiente (ver Figura 40).

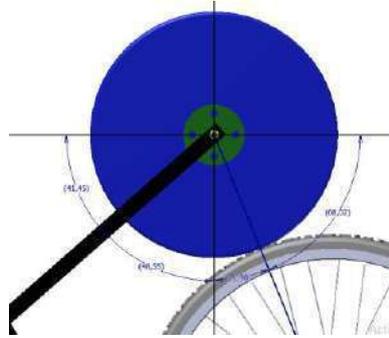


Figura 41: Análisis cinemático del contacto entre el tambor y la rueda.

El diagrama de cuerpo libre dinámico (Figura 42) muestra las fuerzas de reacción que se producen en el contacto, considerando:

- Peso de la mezcla y tambor                      30 kilos.
- Gravedad    9,81  $m/s^2$

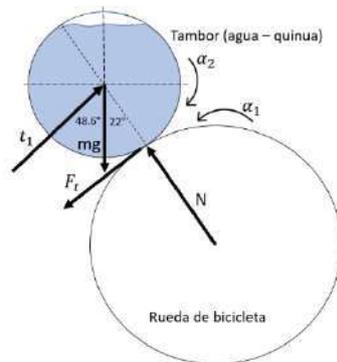


Figura 42: Diagrama de cuerpo libre dinámico.

Del diagrama dinámico, se obtienen las fuerzas de reacción en el eje x e y.

$$\sum F_x = 0 \quad T_1 \cos 41.45^\circ = N \cos 68.02^\circ \quad (21)$$

$$T_1 = N \times 0.5$$

$$\sum F_y = 0 \quad T_1 \sin 41.45^\circ + N \sin 68.02^\circ = mg \quad (22)$$

$$0.66T_1 + 0.93N = 30 \times 9.81$$

$$N = 233.8N, T_1 = 116.9N$$

El fenómeno de fuerza centrífuga es calculado con la siguiente ecuación [47]:

$$f_c = ma_c \quad (23)$$

Sabemos que  $a_c = \omega^2 r_c$ ; además, de la Tabla 10 se sabe que la velocidad angular experimental es de 60 rpm, tenemos:

$$f_c = m \cdot \omega^2 \cdot r_c = 148N \quad (24)$$

Al ser la fuerza centrífuga ( $f_c$ ) menor que la fuerza normal (N), el tambor mantendrá un buen contacto hacia el tambor, por tanto, la transmisión de la velocidad será eficiente.

### Anexo 3: “Análisis del eje masa”

Debido al aumento de peso, los esfuerzos que se presenta en los componentes que conforman la bicicleta son mayores, un elemento a considerar es el eje masa. El eje masa va en el centro de la rueda posterior de la bicicleta y es la que soporta el peso de la persona y el tambor con la mezcla de agua y quinua, por lo que es importante su análisis. En la Figura 42, el diagrama cinemático muestra el peso de una persona mayor de aproximadamente 80 kilos, usando el equipo, además, es importante considerar que el eje masa es de un material de acero 4140 [49] [50].



Figura 43: Diagrama cinemático de la máquina en funcionamiento.

Para fines prácticos, se representa a la máquina como una barra, de ahí, podemos describir el diagrama de cuerpo libre para calcular las fuerzas que se ejercen en los puntos de reacción (ver Figura 43).

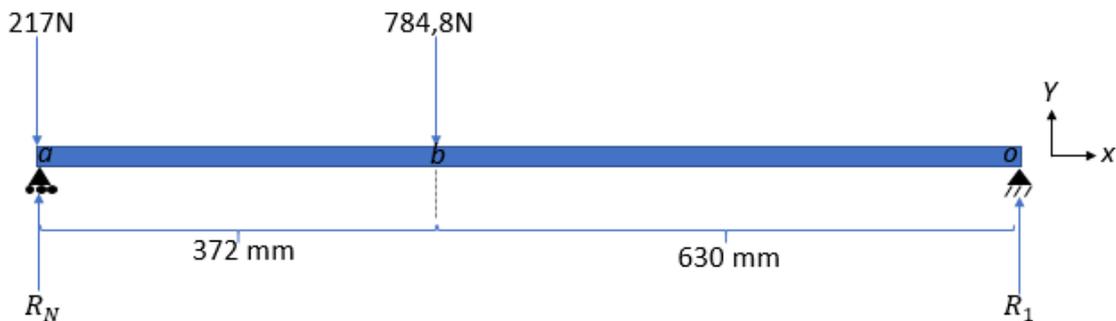


Figura 44: Diagrama de cuerpo libre estático de la lavadora de quinua.

Seguidamente, toma el momento en el punto “o” para calcular las reacciones.

$$\sum M_o = 0 + \varnothing (784,8N)(630mm) + (217N)(1002mm) - (R_N)(1002mm) = 0 \quad (25)$$

$$R_N = 720N, R_1 = 243N$$

A continuación, la Figura 44, muestra el diagrama de cuerpo libre del eje masa puesto en la estructura de la bicicleta.

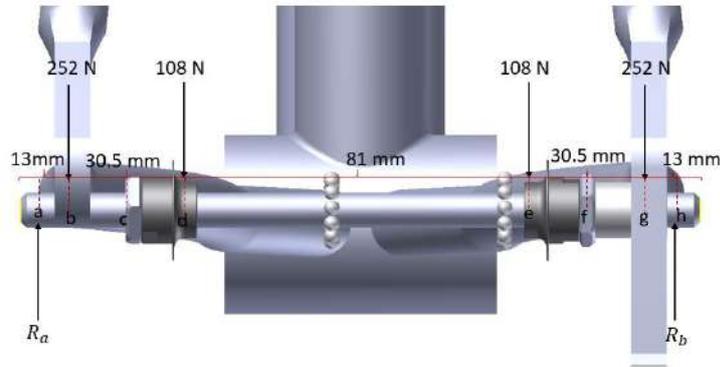


Figura 45: Diagrama de cuerpo libre del eje masa.

Seguidamente calculamos las reacciones en los puntos de apoyo.

$$R_a = R_b = 360N$$

Después, obtenemos los gráficos de fuerzas cortantes y momento flector.

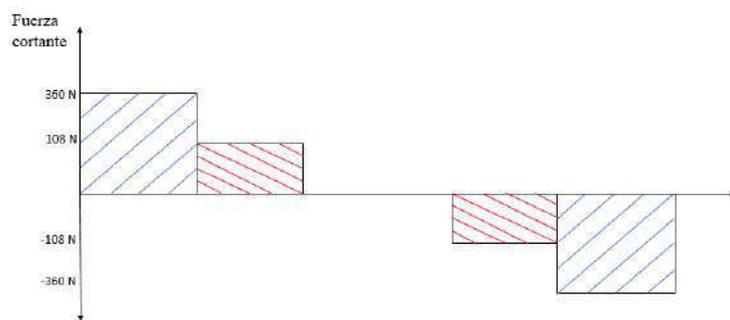


Figura 46: Gráfica de las fuerzas cortantes que se presenta en el eje masa.

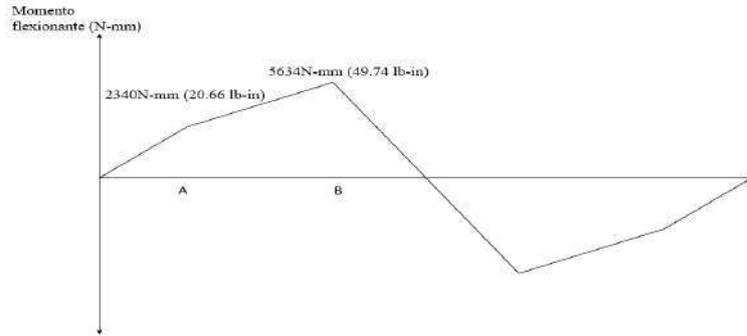


Figura 47: Gráfica de los momentos flectores que se presentan en el eje masa

La ecuación 19 se usa para calcular el diámetro de ejes, según la norma ANSI B106M.

$$D = \left( \frac{32(N)}{\pi} \cdot \sqrt{\left( \frac{K_t(M)}{s'_n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{T}{S_y} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

Teniendo en cuenta:

Material del eje masa: AISI 4140 [50] [46]

$$S_y = 152 \text{ Ksi}; W_u = 168 \text{ Ksi}; S_n = 57 \text{ Ksi}$$

$$N = 2; K_t = 1,5$$

$$C_s = 0.95 \text{ (Anexo A6)} C_R = 0.81$$

$$s'_n = S_n(C_s)(C_R) = 42.3 \text{ Ksi}$$

Cálculo de torque (potencia tomada de la Tabla 11):

$$T = \frac{63000(P)}{n} = 559.06 \text{ lb. pulg} \quad (27)$$

Diámetro calculado con la ecuación 12 en el punto A:  $D = 0.564 \text{ pulg.}$

Diámetro calculado con la ecuación 12 en el punto B:  $D = 0.568 \text{ pulg.}$

Para los esfuerzos encontrados en el eje masa, corresponde un diámetro alrededor de 0.564 – 0.568 pulg. Sin embargo, el eje masa presenta un diámetro de 5/8 pulg (0.625 pulg.). estando lejos del rango máximo aceptable.

#### Anexo 4: “Análisis del eje del tambor”

El eje del tambor es una pieza que soporta y une al tambor y al brazo pivót, permitiendo que el tambor gire libremente, como se observa en la Figura 48, para el cálculo de un adecuado eje, se usará la ecuación 19. El eje es un perno que se ajusta al eje pivót mediante tuercas.

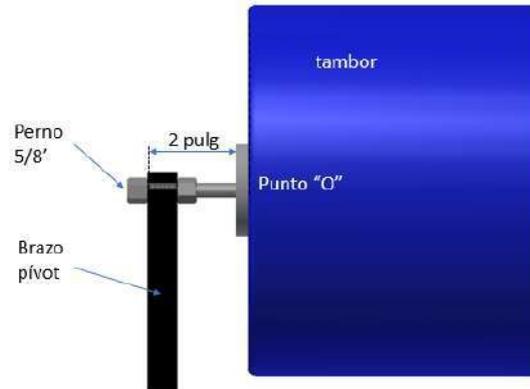


Figura 48: Perno que une el tambor y el brazo pivót.

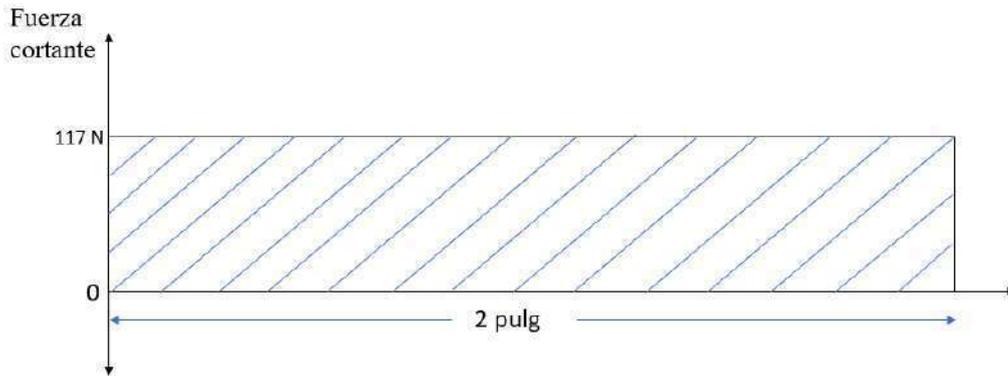


Figura 49: Gráfica de las fuerzas cortantes que se presenta en el perno.

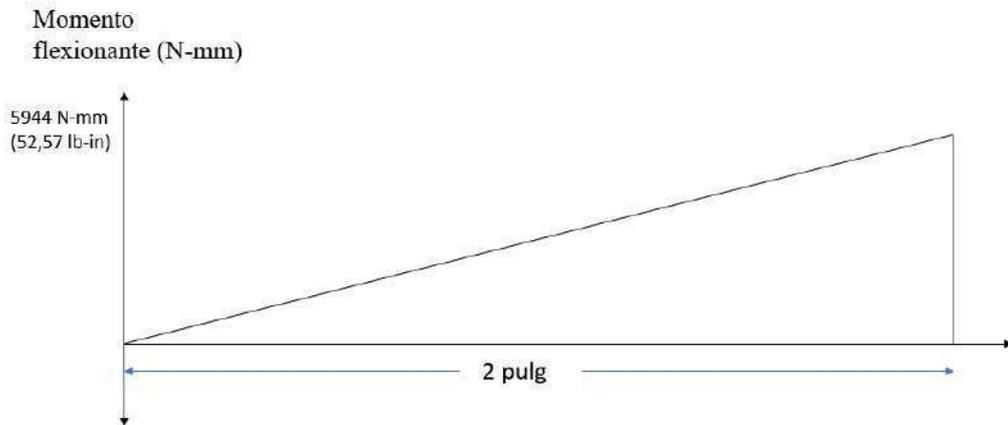


Figura 50: Gráfica de los momentos flectores que se presentan en el perno.

Perno Acero A304 (Fuente: “Diseño de elementos de máquinas” [46])

$$S_y = 241 \text{ MPa (35 Ksi)}$$

$$W_u = 586 \text{ MPa (85 Ksi)}$$

$$S_n = 32,5 \text{ Ksi}$$

$$C_s = 0.87 \quad C_R = 0.81$$

$$S_{n'} = S_n(C_s)(C_R) = 22,9 \text{ Ksi} \quad (28)$$

Calculo de torque (potencia tomada de la tabla 10):

$$T = \frac{63000(P)}{n} = 559.06 \text{ lb.pulg} \quad (29)$$

Diámetro calculado con la ecuación 12,  $D = 0,548 \text{ pulg}$

El perno que se colocará como soporte del tambor deberá tener una media de:  $5/8' \times 3'$

### Anexo 5: “Análisis de unión por soldadura”

La estructura soporte se une a la bicicleta por medio de un voladizo, el cual soporta cargas de flexión  $f_b$  y corte  $f_s$  [46], como se aprecia en la Figura 50.

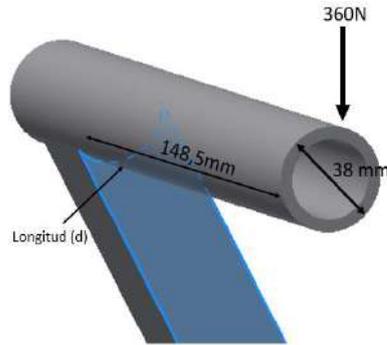


Figura 51: Voladizo que une la estructura soporte con la bicicleta.

$$\text{Momento } M = 0,148m(360N) = 53,28Nm = 471,57 \text{ lb} - \text{pulg} \quad (30)$$

$$S_w = \pi \frac{(d)^2}{8} = \pi \frac{(1,496 \text{ pulg})^2}{8} = 0,879 \text{ pulg}^2 \quad (31)$$

$$A_w = \pi \frac{d}{2} = \pi \frac{1,496 \text{ pulg}}{2} = 2,350 \text{ pulg} \quad (32)$$

$$\text{Fuerza de flexión } f_b: \quad f_b = \frac{M}{S_w} = \frac{471,57 \text{ lb-pulg}}{0,879 \text{ pulg}^2} = 536,48 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}} \quad (33)$$

$$\text{Fuerza cortante vertical } f_s: \quad f_s = \frac{p}{A_w} = \frac{80,93 \text{ lb}}{2,350 \text{ pulg}} = 34,44 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}} \quad (34)$$

Ahora se puede calcular la resultante:

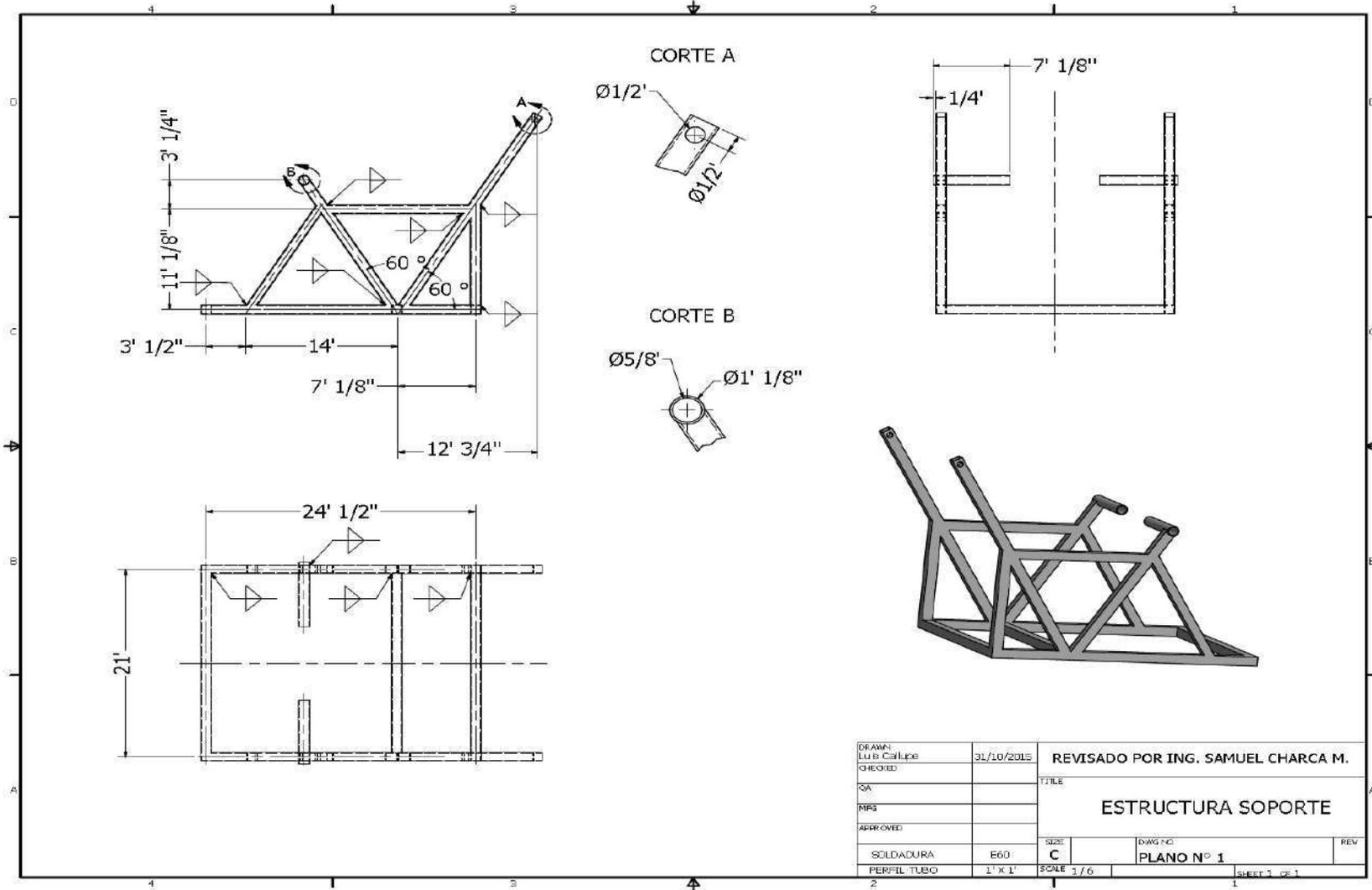
$$f_R = \sqrt{f_b^2 + f_s^2} = 537,58 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}} \quad (35)$$

El electrodo de soldadura E60, presenta una fuerza admisible de 8800 lb/pulg por pulgada de lado [46], entonces:

$$w = \frac{537,58 \text{ lb/pulg}}{8800 \text{ lb/pulg por pulgada}} = 0,061 \text{ pulg} \quad (36)$$

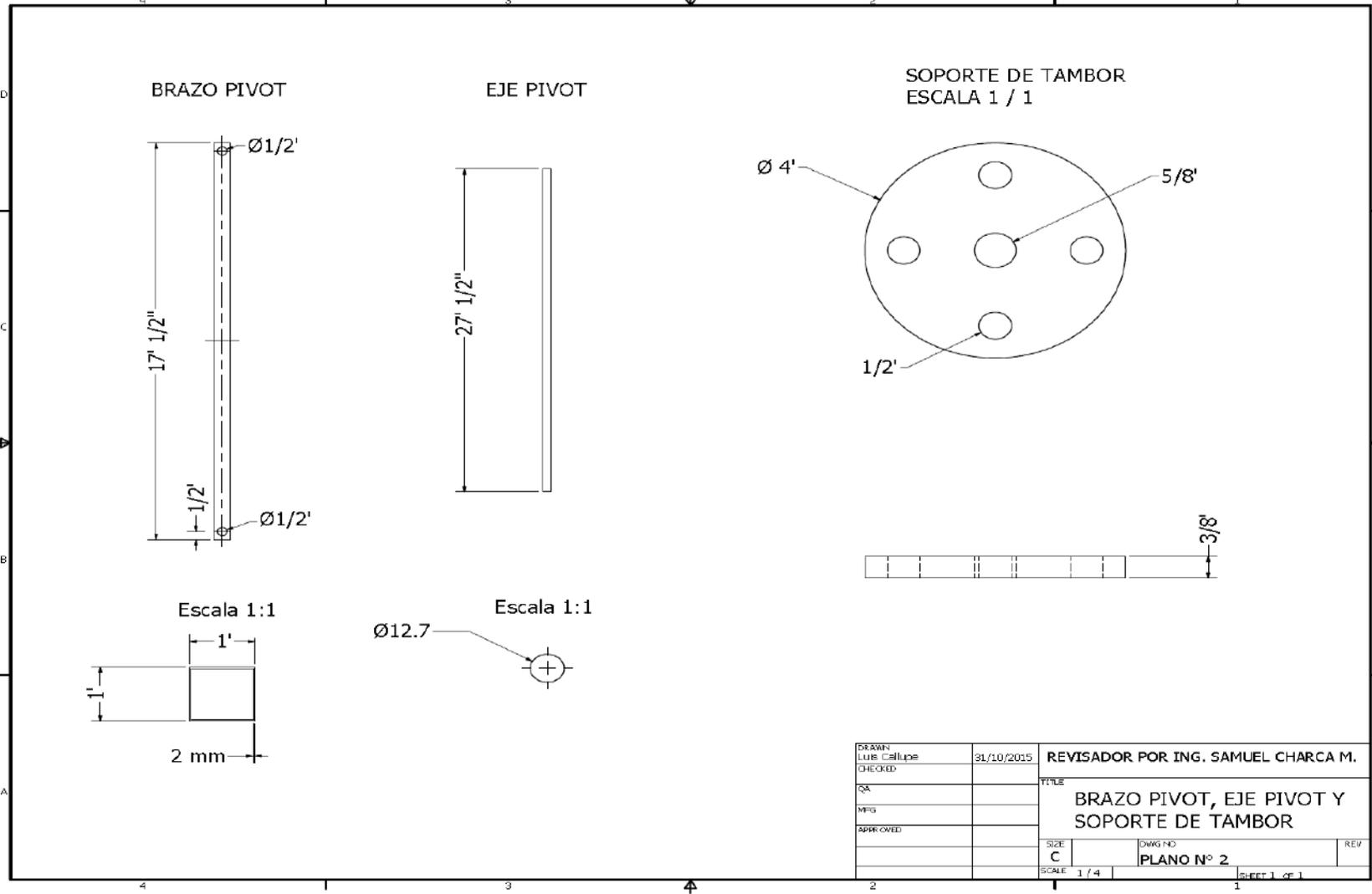
El chaflan de 3/16 de pulgada es satisfactorio [46].

Anexo 6: "Plano de estructura soporte"

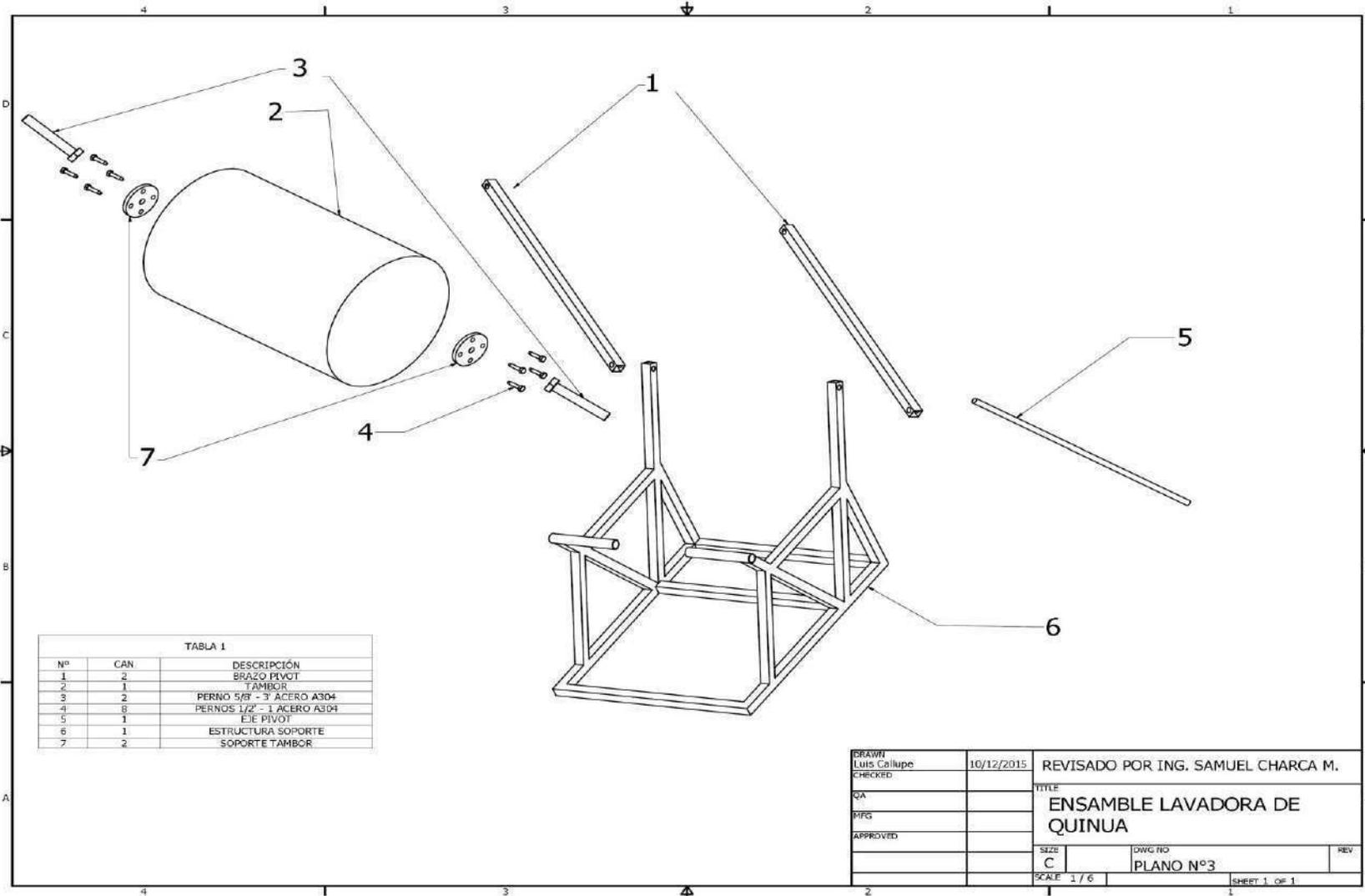


DRAWN: LU B. Callupe CHECKED:	31/10/2015	REVISADO POR ING. SAMUEL CHARCA M.	
QA:		TITLE:	
MRS:		<b>ESTRUCTURA SOPORTE</b>	
APPROVED:		SIZE:	DWG NO:
SOLDADURA:	E60	<b>C</b>	<b>PLANO N° 1</b>
PERFIL TUBO:	1' X 1'	SCALE:	1 / 6
			SHEET 1 OF 1

Anexo 7: "Plano de brazo pivot, eje pivot, soporte de tambor"



Anexo 8: "Plano de ensamble de la estructura posterior"



Anexo 9: "Plano de ensamble tambor interior"

