

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**METODOLOGIA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN  
MOLINO DE MARTILLOS**

Trabajo de investigación para la obtención del grado de bachiller en ciencias  
con mención en ingeniería mecánica

**AUTOR: PAUL JHOSEL FERMIN JIMENEZ**

**ASESOR: Mg. Estela De La Gracia Assureira Espinoza**

**Lima, enero del 2021**

## Resumen

El presente documento comprende el desarrollo de una metodología para el dimensionamiento de un molino de martillos, las cuales tienen un potencial energético importante que debe ser aprovechada. Por un lado, se realiza una caracterización de los residuos agrícolas cañeros (RAC) con la finalidad de conocer las principales características del material a procesar. Por otro lado, se realiza el estado de arte de los principales equipos de molienda, principalmente, del molino de martillos; esto con la finalidad de conocer las ventajas y desventajas de cada tipo de molino y así compararlos con el molino de martillos. Asimismo, se analiza las principales tecnologías de los molinos martillos en la actualidad en base a investigaciones bibliográficas que exponen una comparación entre los molinos de martillos tradicionales con los de nueva tecnología, así como un estudio de materiales a triturar. Estas nuevas tecnologías incluyen información reciente y se aplica en el diseño de un molino de martillos. Finalmente, se desarrolla diagramas de flujo de la secuencia de cálculo para el dimensionamiento de los principales componentes mecánicos del molino de martillos, así como la propuesta para la metodología de ensayo para determinar las fuerzas de impacto sobre las hojas y con ello dimensionar los martillos del molino. Los principales componentes de un molino de martillos son: los martillos, disco porta-martillos, eje principal, perno de sujeción, disco de separación, carcasa del molino, motor eléctrico y la rejilla de filtro; sin embargo, en el presente documento se abarca solamente la metodología para el dimensionamiento de algunos componentes tales como los martillos, discos porta-martillos, perno de sujeción y eje principal debido a que estos son la base del principio de funcionamiento de un molino de martillos.

## ÍNDICE DEL CONTENIDO

Introducción.....	1
Capítulo 1.....	3
1 Caracterización de los RAC .....	3
1.1 Descripción de los RAC .....	3
1.2 Propiedades físicas.....	4
1.2.1 El efecto del contenido de humedad .....	4
1.2.2 Contenido de cenizas.....	5
1.2.3 Densidad.....	6
1.3 Propiedades químicas.....	7
1.3.1 Carbono (C), Hidrogeno (H) y Oxígeno (O).....	7
1.3.2 Nitrógeno (N) .....	8
1.4 Índice de grindabilidad .....	9
Capítulo 2.....	12
2 Estado del arte de equipos de molienda.....	12
2.1 Equipos de molienda.....	12
2.2 Tipos de molienda.....	12
2.2.1 Molinos de fricción .....	12
2.2.2 Molino de rodillos .....	13
2.2.3 Molinos de bolas .....	14
2.2.4 Molino de martillos .....	14
2.3 Aspectos importantes para comparación entre molinos .....	15
2.4 Principio de funcionamiento del molino de martillos .....	16
2.5 Partes del molino de martillos .....	16
2.5.1 Eje principal .....	17
2.5.2 Discos .....	18
2.5.3 Martillo .....	18
2.5.4 Rejilla.....	18
2.6 Estado del arte del molino de martillos.....	19
2.6.1 Energía de trituración en molino de martillos.....	19
2.6.2 Estudio comparativo entre un tradicional y nuevo molino de martillos ....	21
Capítulo 3.....	27

3	Metodología para el dimensionamiento de un molino de martillos.....	27
3.1	Metodología para determinación experimental de la energía de ruptura de las hojas de caña .....	27
3.2	Dimensionamiento de los martillos .....	31
3.3	Dimensionamiento del disco porta-martillos .....	33
3.4	Dimensionamiento del perno porta-martillos .....	34
3.5	Dimensionamiento del eje principal .....	35
	Conclusiones.....	37
	Bibliografía .....	38



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición de la caña de azúcar .....	4
Tabla 1.2. Comparación de humedad, cenizas y poder calorífico para distintas variedades de RAC analizadas .....	5
Tabla 1.3. Densidades de los RAC en distintos formatos (kg/m <sup>3</sup> ) .....	7
Tabla 1.4. Composición química de los residuos de caña .....	7
Tabla 1.5. Parámetros básicos de los materiales testeados .....	10
Tabla 2.1. Molino de martillos – datos técnicos referenciales .....	15
Tabla 2.2. Propiedades físicas del material de prueba .....	22
Tabla 2.3. Valores de las variables del ensayo .....	23
Tabla 3.1. Análisis estadístico de los datos del experimento .....	30



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Morfología de la caña de azúcar.....	3
Figura 1.2. Efecto de la humedad sobre el poder calorífico .....	5
Figura 1.3. Contenido de cenizas en los RAC de acuerdo a la profundidad en la pila ..	6
Figura 1.4. Emisiones NO <sub>x</sub> para diferentes biocombustibles .....	8
Figura 2.1. Molinos de fricción: a) Disco único, b) Disco doble, c) Molino de piedras ..	13
Figura 2.2. Esquema de un molino de rodillos .....	13
Figura 2.3. Molino de bolas .....	14
Figura 2.4. Esquema de un molino de martillos .....	14
Figura 2.5. Principio de funcionamiento del molino de martillos.....	16
Figura 2.6. Partes principales del molino de martillos .....	17
Figura 2.7. Eje principal del molino.....	18
Figura 2.8. Discos acoplados al eje principal .....	18
Figura 2.9. Martillos del molino .....	18
Figura 2.10. Rejilla o criba .....	19
Figura 2.11. Energía total específica del pasto varilla, paja de trigo, y rastrojo de maíz con velocidad del molino de martillos para 90° y 30° .....	20
Figura 2.12. Rotor de un molino de martillos tradicional .....	21
Figura 2.13. Rotor de un molino con martillos en forma circular .....	22
Figura 2.14. Efecto del ángulo de martillo sobre el rendimiento para 5 valores diferentes de velocidad periférica .....	24
Figura 2.15. Efecto de la velocidad periférica sobre el rendimiento para 5 valores diferentes de ángulo de martillo.....	24
Figura 2.16. Efecto del ángulo de martillo sobre el consumo de energía específico para 5 valores diferentes de velocidad periférica.....	25
Figura 2.17. Efecto de la velocidad periférica de martillo sobre el consumo de energía específico para 5 valores diferentes de ángulo de martillo .....	26
Figura 3.1. Esquema del ensayo de impacto .....	29
Figura 3.2. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del ensayo de impacto .....	31
Figura 3.3. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del dimensionamiento del martillo .....	33
Figura 3.4. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del dimensionamiento de disco porta-martillos .....	34
Figura 3.5. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del dimensionamiento del perno porta-martillos .....	35

Figura 3.6. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del dimensionamiento del eje principal.....36



## Introducción

El aprovechamiento de los residuos agrícolas es una actividad desarrollada en el mundo durante varios años, con el fin de aprovechar estos desperdicios para cubrir las necesidades de las personas. Los usos de estos productos son varios y depende del sector a ser utilizados. Por un lado, estos residuos son utilizados como alimento para el ganado animal. Por otro lado, estos residuos biomásicos son utilizados como fuente energética, en forma de combustible, tras procesos posteriores a la recolección de estos residuos.

De acuerdo a la investigación acerca del “Potencial energético de la biomasa en el Perú” realizado por la Mg. Estela Assureira, se muestra que los departamentos costeros, principalmente Lambayeque y La Libertad, poseen un importante valor energético, las cuales pueden producir aproximadamente unas 500,000 TEP (toneladas equivalentes de petróleo) y 778,000 TEP respectivamente.

Asimismo, existen diversas formas de aprovechar este potencial energético tales como la combustión de las mismas, la gasificación o el desarrollo de combustibles de segunda generación. En el caso particular de las hojas de caña de azúcar, el cual es el cultivo de biomasa más importante en el Perú, las hojas no son casi usadas en ningún campo de aplicación y simplemente son eliminadas por parte de los agricultores.

Por ello, ante la problemática del correcto uso de las hojas de caña, el Grupo de Investigación Carbón Biomasa de la PUCP está desarrollando una propuesta de solución que brinda un mejor uso de los desechos de la cosecha de la caña de azúcar para utilizarlos como fuente de energía y como insumo para la producción de materiales de construcción.

La propuesta de solución consiste en transformar las hojas de caña en pequeñas briquetas para que posteriormente sean quemadas, obteniendo así calor de la combustión y cenizas con características puzolánicas que pueden reemplazar el 20% de una bolsa de cemento. Para conseguir esto, en primer lugar, se requiere reducir el tamaño de las hojas de caña hasta conseguir una granulometría final adecuada utilizando diversos equipos tales como los molinos de martillo.

## **Alcances**

- Caracterización de los RAC.
- Estado del arte de los equipos de molienda.
- Metodología de diseño del molino de martillos.

## **Objetivo general**

Elaborar una metodología para dimensionar los principales componentes mecánicos de un molino de martillos que procesa hojas de caña de azúcar.

## **Objetivos específicos**

- Caracterizar los residuos agrícolas cañero (RAC).
- Revisar el estado del arte de los equipos de molienda.
- Comparar los equipos de molienda con el molino de martillos.
- Elaborar metodologías para el diseño de los componentes de un molino de martillos.

## Capítulo 1

El presente capítulo abarca la caracterización de los Residuos Agrícolas Cañeros (RAC) analizando sus propiedades físicas, químicas y bioquímicas, así como una propuesta para determinar el índice de grindabilidad del material, el cual cuantifica la resistencia que tiene el material a la reducción de tamaño y con ello se puede determinar la energía que consume el molino.

### 1 Caracterización de los RAC

#### 1.1 Descripción de los RAC

También conocidos como Residuos Agrícolas Cañeros, son residuos de biomasa residual que se acumulan en el sector agroindustrial. Estos son obtenidos luego de realizar la cosecha ya sea de forma manual o mecanizada, quedando residuos agrícolas de cosecha o RAC.

La morfología de la caña de azúcar se muestra en la figura 1.1, en la cual se indican sus principales componentes tales como el cogollo, tallo, hojas y chulquines.

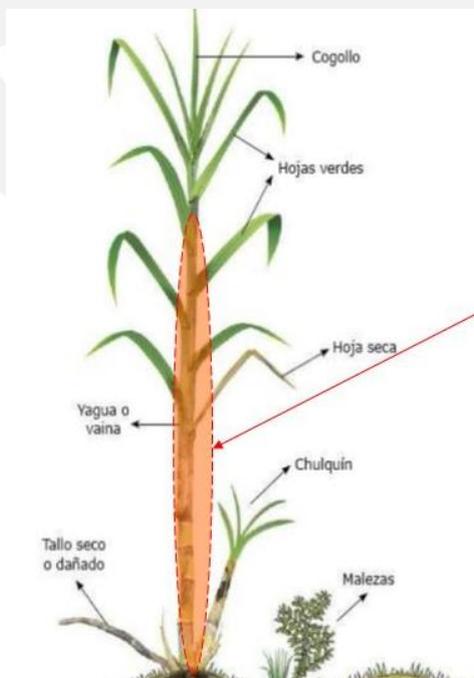


Figura 1.1. Morfología de la caña de azúcar.  
(Fuente: Cenicaña, 2015)

Asimismo, la tabla 1.1 muestra el porcentaje de los principales componentes de la caña de azúcar

Tabla 1.1. Composición de la caña de azúcar

<b>Componente</b>	<b>Contenido (%)</b>
Cogollo y hojas verdes	8,44
Vainas y hojas secas(paja)	19,74
Tallos limpios	71,82

Fuente: ICIDCA, 2013

## **1.2 Propiedades físicas**

Las propiedades físicas de los RAC son aquellas que pueden apreciar con relativa facilidad y que pueden ser alteradas en su forma, mas no en su composición química. Las propiedades más comunes de los RAC son la humedad, la densidad, el poder calorífico, el contenido de cenizas y la volatilidad del material.

### **1.2.1 El efecto del contenido de humedad**

Es la energía que se genera en una reacción química y puede ser transformada directamente en energía térmica; es decir, es la cantidad de calor que puede entregar un combustible. Existen dos formas de expresar el poder calorífico de un combustible. Se utiliza el Poder Calorífico Superior (PCS) o también llamado Poder Calorífico Bruto (PCB) para medir la cantidad de calor que se produce mediante la combustión; sin embargo, una parte de ese calor permanecerá en el calor latente de la evaporación del agua existente en el combustible durante la combustión. Asimismo, el Poder Calorífico Inferior (PCI) o también llamado Poder Calorífico Neto (PCN) excluye el calor latente y, por consiguiente, el valor térmico más bajo es la cantidad de calor disponible realmente en el proceso de combustión para captarlo y utilizarlo.

Por otro lado, el efecto de la humedad cobra gran importancia para determinar el poder calorífico de un combustible, ya que cuanto mayor sea el contenido de humedad de un combustible mayor será la diferencia entre el PCB y el PCN, y menor será la energía total disponible tal y como se muestra en la figura 1.2. Por ello, es recomendable reducir la humedad de los combustibles antes de someterlos a una reacción química.

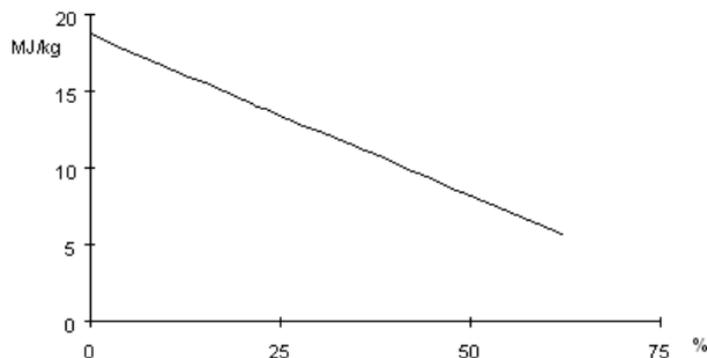


Figura 1.2. Efecto de la humedad sobre el poder calorífico  
(Fuente: FAO, 2008)

En el caso de los residuos agrícolas de cañeros (RAC), el poder calorífico también varía de forma negativa con la humedad. Por ello, es importante realizar una comparación de valores promedios de humedad y poder calorífico tal y como se muestra en la tabla 1.2. En esta se aprecian valores promedio de humedad, cenizas y poder calorífico para distintas variedades de caña de azúcar analizadas.

Tabla 1.2. Comparación de humedad, cenizas y poder calorífico para distintas variedades de RAC analizadas

	LCP 85-384	LCP 65-357	TUCCP 77-42	Promedio
Humedad % (b.h.)	11,17	10,26	10,37	10,60
Cenizas % (b.s.)	11,81	9,45	12,91	11,39
PCS KJ/kg (b.s.)	13.010,11	14.067,65	14.820,38	13.966,04
PCI KJ/kg (b.h.)	10.234,87	11.284,18	11.987,10	11.168,72

Fuente: Revista industrial y agrícola de Tucumán, 2015

A partir de estos ensayos realizados, se puede determinar contenidos de humedad y cenizas, PCI y PCS de muestras de los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) de algunas de las variedades de caña de azúcar más abundantes. Por ende, se determinó que el contenido de humedad promedio de los RAC es de 10.6 %, mientras el PCS y el PCI son de, aproximadamente, de 13,966 KJ/kg y 11,168 KJ/kg respectivamente.

### 1.2.2 Contenido de cenizas

El porcentaje de cenizas representa la cantidad de materia sólida no combustible por cada kilogramo de material. El contenido de cenizas es bastante variado dependiendo

del tipo de biomasa a utilizar. Asimismo, según la tabla 1.4 desarrollado en tópico anterior, se puede determinar un contenido de cenizas promedio del 11.4 % en los RAC. Sin embargo, esta cantidad depende muchas veces de la profundidad en la que se encuentren los RAC en la pila sobre el campo, ya que se realizó un análisis de contenido de cenizas variando la locación donde se recolectan los RAC tal y como se muestra en la figura 1.3.

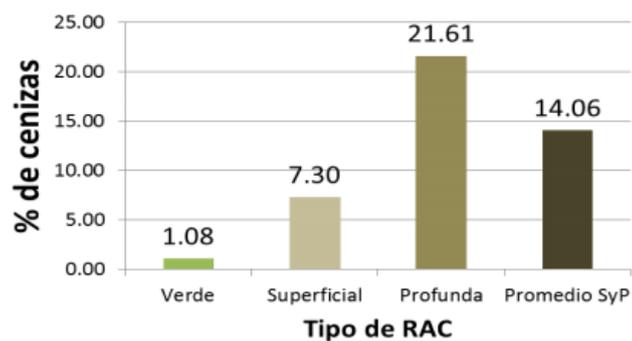


Figura 1.3. Contenido de cenizas en los RAC de acuerdo a la profundidad en la pila (Fuente: CENGICAÑA, 2017)

Asimismo, la altura de la pila de los RAC sobre el suelo presenta un promedio de 0.10 metros, valor que empieza a disminuir conforme los RAC se secan, esta es una razón más para que los RAC sean recolectados uno o más tardar dos días después del corte.

### 1.2.3 Densidad

La densidad se define como el peso por unidad de volumen y varía ampliamente entre las diferentes sustancias. Por un lado, la densidad en los RAC depende de la humedad y algunas otras propiedades de la biomasa. Por otro lado, en el caso de los RAC, la densidad también depende del estado en el que se encuentran los RAC, ya que, por ejemplo, en briqueta los RAC tienen una densidad alta mientras que en estado de picado por corte posee una densidad mucho menor. La tabla 1.3 muestra las densidades de los RAC que se encuentran en distintas formas.

Tabla 1.3. Densidades de los RAC en distintos formatos (kg/m<sup>3</sup>)

Parámetros	Valores
Densidad a granel (Kg/m <sup>3</sup> ) a 40-55% de humedad	25-40
Densidad picado (Kg/m <sup>3</sup> ) a 40% humedad	80
Densidad empacado (Kg/m <sup>3</sup> ) a 30% de humedad	170-225
Briqueta mediana densidad a 25 % humedad	400
Briqueta alta densidad a 25 % humedad	1200

Fuente: INTA, 2013

Para el presente trabajo se va utilizar los RAC en formato de trozos picados en longitudes que varíen entre los 1 a 2 cm. Por ello la densidad que se va utilizar para el diseño de martillos y demás componentes es el de 80 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.3 Propiedades químicas

Las propiedades químicas son propiedades que alteran la estructura interna de un material. Asimismo, la composición química de este tipo de biomasa se muestra en la tabla 1.4. En esta tabla se aprecia similitudes de los residuos de caña con el bagazo respecto a los componentes químicos y a su cantidad.

Tabla 1.4. Composición química de los residuos de caña

Determinación	Hojas secas	Hojas verdes	Puntas	Bagazo
Carbono	46.2	45.7	43.9	44.6
Hidrógeno	6.2	6.2	6.1	5.8
Nitrógeno	0.5	1	0.8	0.6
Oxígeno	43	42.8	44	44.5
Azufre	0.1	0.1	0.1	0.1
Cloro	0.1	0.4	0.7	0.02

Fuente: Tufaile, 2005

#### 1.3.1 Carbono (C), Hidrogeno (H) y Oxígeno (O)

El Carbono (C), Hidrógeno (H) y Oxígeno (O) son los principales componentes que se encuentran en los RAC. Por un lado, el C y el H son oxidados durante la combustión por reacciones exotérmicas formando los compuestos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Asimismo, el contenido de C y H afecta positivamente en el crecimiento del poder calorífico bruto, mientras que el contenido de O afecta negativamente. Además, el H afecta el poder calorífico neto debido a la formación de agua.

### 1.3.2 Nitrógeno (N)

Durante la combustión, el Nitrógeno (N) es prácticamente transformado en  $N_2$  y  $NO_x$ . La cantidad de Óxido Nitroso ( $N_2O$ ) es muy baja en los modernos hornos para biocombustibles. Solamente una pequeña cantidad de N es incorporada en la ceniza. Sin embargo, se conoce que uno de los principales impactos ambientales de los biocombustibles es causada por las emisiones del  $NO_x$ . Asimismo, el  $NO_x$  puede ser formado por 3 diferentes caminos.

En primer lugar, se puede formar  $NO_x$  de manera térmica, ya que es formado de la reacción del N con radicales de O a temperaturas superiores de  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ . La cantidad de  $NO_x$  se incrementa conforme se aumenta la temperatura. En segundo lugar, se puede formar  $NO_x$  de manera rápida, ya que es formado del N a temperaturas superiores de  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  bajo condiciones de reducido oxígeno en presencia de hidrocarburos. Finalmente, se puede formar  $NO_x$  de la oxidación del biocombustible. Las emisiones  $NO_x$  se incrementan con el aumento del contenido del N en el biocombustible

La figura 1.4 muestra una gráfica comparativa de las emisiones  $NO_x$  y las potenciales reducciones para diferentes biocombustibles y tecnologías de limpieza de gases de combustión.

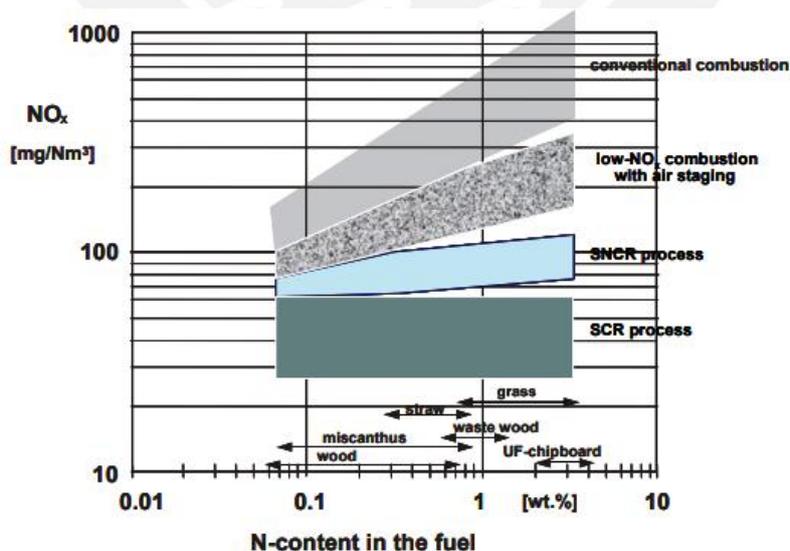


Figura 1.4. Emisiones  $NO_x$  para diferentes biocombustibles  
(Fuente: Oberberger, Ingwald, Brunner, Thomas y Barnthaler, Georg, 2006)

## 1.4 Índice de grindabilidad

El índice de grindabilidad es el parámetro que mejor refleja la resistencia a la reducción de tamaño de un material. Las ecuaciones que describen el índice de molienda, en la mayoría de casos, de las teorías de conminación de Rittinger, Kick y Bond. Actualmente, no existe un procedimiento estándar para evaluar la biomasa; sin embargo, según el artículo "An investigation of biomass grindability", se ha desarrollado un método para la determinación de la grindabilidad de la biomasa, lo que permite clasificar a los distintos tipos de biocombustibles sólidos según sus propiedades de molienda.

El punto de partida para el desarrollo del índice de grindabilidad de biomasa fue el método estandarizado VUK, la cual está basado en la teoría de conminación de Bond. El índice de grindabilidad de acuerdo al método de VUK es descrito como:

$$GI_{VUK} = \sqrt{\frac{1}{x_{p50}}} - 1$$

Donde  $X_{p50}$  es el diámetro principal de las partículas del producto. Asimismo, la mayoría se derivan de la siguiente ecuación:

$$\frac{dE}{dx} = -Cx^{-n}$$

Donde  $C$  es un coeficiente del material y  $dE$  es la energía específica para fracturar y cambiar de tamaño a la partícula. Luego del cambio de tamaño de partícula  $x_1$  a  $x_2$ , la energía de trituración  $E_{1-2}$  queda definido de la siguiente manera:

$$E_{1-2} = \frac{C}{n-1} (x_2^{1-n} - x_1^{1-n})$$

En el caso de la teoría de Bond, sobre la cual se basa el método de VUK, el exponente  $n$  es igual a 1,5. Por lo tanto, la energía de trituración queda definida de la siguiente manera:

$$E_{1-2} = 2C(x_2^{-0,5} - x_1^{-0,5})$$

Después, el índice de molienda de VUK, especifica la capacidad de trituración de un material dado con relación con otro material de referencia. Respecto al material de referencia, para un diámetro de producto  $X_{p50,0} = 0.25\text{mm}$  y diámetro de la muestra de entrada  $X_{w50,0} = 1\text{mm}$ , de acuerdo a la ecuación de

$$GI_{VUK} = \frac{E}{E_0} = \sqrt{\frac{1}{x_{p50}}} - 1$$

energía de trituración se tiene que  $E_o = 2C$ . Por lo tanto, el índice de grindabilidad de VUK toma la forma de:

El índice de molienda será mayor cuando menor sea el diámetro del producto. Asimismo, el material de referencia se asume con la finalidad de eliminar el valor del consumo de energía del material.

Además de lo anterior, se determina un índice de molienda basado en la ecuación general de trituración para la realización de:

$$E_{1-2} = W_i \gamma^{n-1} \left( \frac{1}{x_1^{n-1}} - \frac{1}{x_2^{n-1}} \right)$$

Donde  $W_i$  representa el índice de trabajo (fundamental para determinar la potencia de trituración) y  $E_{1-2}$  representa a la demanda de energía específica para la trituración de las partículas. Finalmente, despejando el índice de trabajo ( $W_i$ ), se obtiene la siguiente expresión:

$$W_i = I_w = \frac{E_{1-2}}{\gamma^{n-1} \left( \frac{1}{x_1^{n-1}} - \frac{1}{x_2^{n-1}} \right)}$$

La tabla 1.5 muestra los parámetros básicos, así como el índice de grindabilidad de algunos materiales testeados en la evaluación del experimento.

Tabla 1.5. Parámetros básicos de los materiales testeados

No. Parameter	Sym. Unit.	Wood pellets	Sunfl. husk pellets	Herb. pellets	Strawpellets	Misca.briq.	Strawmix.	Palm Kern Shell
		WP	SPH	HPN	SMX1	MB	SMX2	PKS
1 Total moisture content	$W^r$ %	7,3	9,7	9,2	11,7	10,2	13,6	18
2 Ash content	$A^r$ %	0,7	4,6	4,5	9,5	3,8	5,6	2,4
3 Analytical moisture content	$W^a$ %	5,9	8,9	8,6	8,9	5,9	8,8	9,9
4 Bulk density	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	439	417	433	422	244	124	667
5 Sample size fraction 0.5–2 mm(oversize in feed sample)	$R_{0,6}$ %	79,9	71,6	77,5	87,1	80,2	93,4	96,2
	$R_{0,8}$ %	59,9	57,9	60,4	75,4	63,8	84,9	90,5
	$R_{1,0}$ %	42,6	45,8	46,6	63,6	48,8	70,56	83,2
	$R_{1,2}$ %	28,4	36,7	33,1	50,9	30,5	56,7	72,7
	$R_{1,5}$ %	14,3	19,9	16,2	32,3	15,9	31,3	8,1
10 Grindability index –volume	$I_{Ev}$ –	6,9	3,9	2,4	2,2	3,3	2,4	12,5
11 Grindability index – mass	$I_E$ –	16,2	9,3	5,9	5,4	13,8	19,7	19,7
12 Grindability index – according to work index	$I_W$ –	7,4	4,5	1,7	1,7	10,7	17,0	18,0

Fuente: Mateusz Tymoszek, Kazimierz Mroczek, Sylwester Kalisz, Henryk Kubiczek, 2019

De la tabla anterior, se puede apreciar que el parámetro número 12 representa al índice de grindabilidad, el que se encuentra relacionado a su vez con el índice de trabajo ( $W_i$ ), el cual es importante para determinar la potencia necesaria del molino y así seleccionar el motor más adecuado.

Para determinar el índice de grindabilidad de las hojas de caña se requiere de un laboratorio, un molino batch y otros instrumentos, lo cual se dificulta en estos momentos por el estado de emergencia; sin embargo, en el capítulo 3 se desarrolla una metodología para determinar la energía de ruptura de las hojas de caña, la cual a su vez servirá para determinar la potencia necesaria que requiere el molino.

## **Capítulo 2**

Este capítulo abarca la revisión de los equipos de molienda y los principales tipos de molinos que existen en la actualidad. Asimismo, se presenta una comparación de los principales equipos de molienda utilizados en la actualidad con el molino de martillos, así como una revisión de las nuevas tecnologías de diseño para este equipo.

### **2 Estado del arte de equipos de molienda**

#### **2.1 Equipos de molienda**

Equipos que abarcan tanto la desintegración como la pulverización fina de la subdivisión intermedia a partículas pequeñas. La diferencia está en la homogeneidad física del material manejado. La desintegración se refiere a la reducción del tamaño de agregado de partículas blandas débilmente ligadas entre sí y no se produce cambio alguno en el tamaño de las partículas fundamentales de la masa. Los equipos que hacen el trabajo de molienda pueden llegar a tocarse y, el único medio que evita que se toquen es el material a moler, tanto en molienda seca como en molienda húmeda.

#### **2.2 Tipos de molienda**

En la actualidad, existen diversos equipos de molienda según sus distintas aplicaciones, los más importantes son los molinos de discos, martillos, bolas y rodillos.

##### **2.2.1 Molinos de fricción**

Los molinos que utilizan las fuerzas de cizalla para la reducción de tamaño juegan un papel muy importante en la molienda fina. Como la molienda se usa en la industria alimenticia fundamentalmente para producir partículas de tamaño muy pequeño, esta clase de molinos es muy poco común. En la figura 2.1 se muestra los tipos de molinos de fricción.

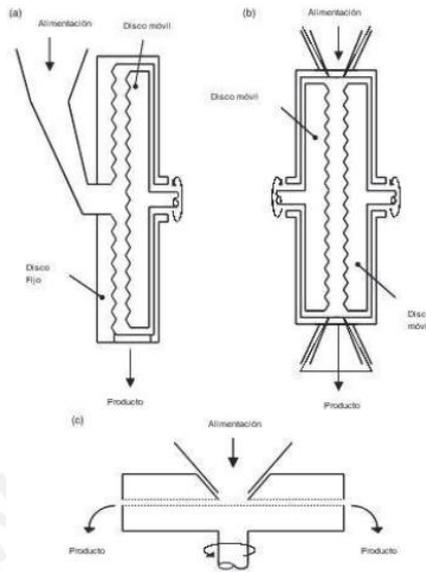


Figura 2.1. Molinos de fricción: a) Disco único, b) Disco doble, c) Molino de piedras  
(Fuente: Ortega Rivas, 2005)

## 2.2.2 Molino de rodillos

Esta máquina tiene 2 o más rodillos que giran en sentidos contrarios. Las partículas de la carga quedan atrapadas y son obligadas a pasar entre los rodillos, siendo trituradas por la fuerza de compresión y esfuerzos de cizalla. Asimismo, este molino dispone de un resorte de compresión para el exceso de carga, a fin de proteger la superficie de los rodillos tal y como se muestra en la figura 2.2. Los rodillos trituradores se utilizan para una trituración intermedia y se usan mucho en la molienda del trigo. En otros casos, la superficie de los rodillos puede ser estriada, para facilitar la fricción y separación.

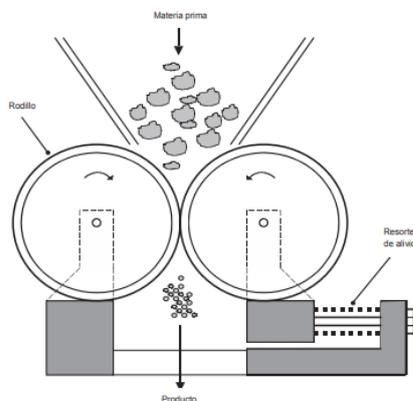


Figura 2.2. Esquema de un molino de rodillos  
(Fuente: Ortega Rivas, 2005)

### 2.2.3 Molinos de bolas

En los molinos de bolas, se operan simultáneamente las fuerzas de impacto y cizalla. Están constituidos por un molino giratorio, horizontal, que se mueve a poca velocidad, en cuyo interior se halla un cierto número de bolas de acero y piedras duras. A medida que el cilindro gira, las piedras se elevan por las paredes del cilindro y caen sobre el producto a triturar, que llenan el espacio libre entre las bolas. La figura 2.3 muestra un esquema de un molino de bolas.

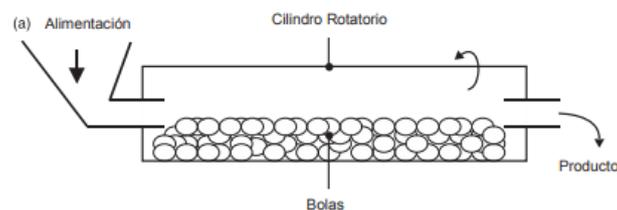


Figura 2.3. Molino de bolas  
(Fuente: Ortega Rivas, 2005)

### 2.2.4 Molino de martillos

Este tipo de molino es bastante común en la industria alimenticia. Un eje rotatorio que gira a gran velocidad, lleva un collar con varios martillos en su contorno tal y como se muestra en la figura 2.4. La reducción de tamaño se debe principalmente a las fuerzas de impacto. Con frecuencia los martillos se sustituyen por barras. Asimismo, no se recomienda para la molienda fina de materiales muy duros, por el excesivo desgaste que sufren las barras. Asimismo, la tabla 2.4 muestra las características referenciales de los molinos de martillos tales como granulometría, campo de aplicación, tipo de material a moler, etc.

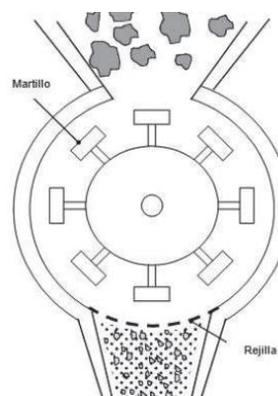


Figura 2.4. Esquema de un molino de martillos  
(Fuente: Ortega Rivas, 2005)

Tabla 2.1. Molino de martillos – datos técnicos referenciales

Molino de martillos	
Aplicación	Molienda preliminar y fina
Campos de aplicación	Geología/metallurgia/materiales de construcción/química/plástico/vidrio/cerámica/agroindustria
Tipo de material a moler	Duro, semiduro y frágil (hasta 8 Mohs)
Principio de molienda	Impacto
Dimensión de cámara de molienda (mm)	Largo/ancho/altura de 2310/1665/1610 a 3720/2650/2540 (minería)
	Ancho/diámetro De 150/250 a 120/150 (agroindustria)
Granulometría inicial (mm)	< 100 (minería)
	< 40 (agroindustria)
Granulometría final	De 0 a 3 mm (minería)
	< 100 µm (agroindustria)
% de humedad del material a moler	Hasta el 20% (en molienda húmeda)
Rpm (referencial)	500 rpm a 1000 rpm (minería)
	Hasta 2000 rpm (agroindustria)
Producción toneladas/hora	De 35 a 100 (minería)
	De 0.05 a 3 (agroindustria)
Potencia (kW)	De 75 a 132 (minería)
	De 3 a 38 (agroindustria)
Material de los martillos	Acero al manganeso (minería)
	Acero al carbono (agroindustria)

(Fuente: FMB, 2014)

### 2.3 Aspectos importantes para comparación entre molinos

Para realizar la comparación entre los tipos de molino es necesario tener claro los siguientes aspectos:

- **Tipo de material a moler:** Las hojas de caña son Residuos Agrícolas Cañero (RAC) y, además, es un material frágil.
- **Campo de aplicación:** el campo de aplicación del proyecto se enfoca principalmente en el sector agroindustrial.
- **Granulometría inicial:** La longitud de las hojas varía entre 0.5cm y 2cm (agroindustria).
- **Granulometría final:** La malla Mesh 50 permite el paso de partículas de 0.297mm de diámetro.

## 2.4 Principio de funcionamiento del molino de martillos

El principio de funcionamiento de un molino de martillos comienza por la tolva de ingreso, el cual sirve como para el material que se quiere triturar, y que a su vez el material cae por gravedad hacia la cámara de trituración, el cual se desarrolla el proceso de molienda. Luego, dentro de la cámara se encuentra un eje que gira a gran velocidad y mediante los martillos que van unidos al eje golpean constantemente al material hasta que alcance un tamaño adecuado para que logre pasar por la rejilla (criba) que se encuentra en la parte inferior. La figura 2.5 muestra el principio de funcionamiento de un molino de martillos.

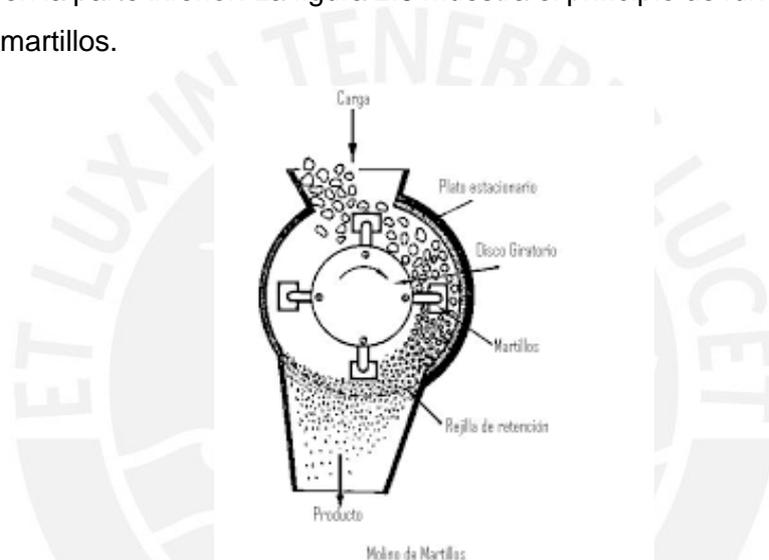


Figura 2.5. Principio de funcionamiento del molino de martillos  
(Fuente: Universidad de los Andes, 2004)

Asimismo, la granulometría final del material puede variar cambiando el tamaño de los orificios de las rejillas (criba), la velocidad del eje o el dimensionamiento de los martillos. Por ello, se recomienda que la velocidad del eje se encuentre entre 1800 a 3600 RPM, la velocidad de los extremos de los martillos varíe entre 70 y 100 m/s y que la separación de los martillos se encuentre entre 1,5 y 7,5 cm dependiendo del material a triturar.

Finalmente, existen algunas configuraciones de los molinos de martillos tales como de eje simple o doble; sin embargo, el principio de funcionamiento es el mismo.

## 2.5 Partes del molino de martillos

El molino de martillos posee elementos tales como una tolva de entrada, eje principal, cubierta, martillos, discos, etc. La figura 2.6 muestra detalladamente las principales partes de los molinos de martillos.

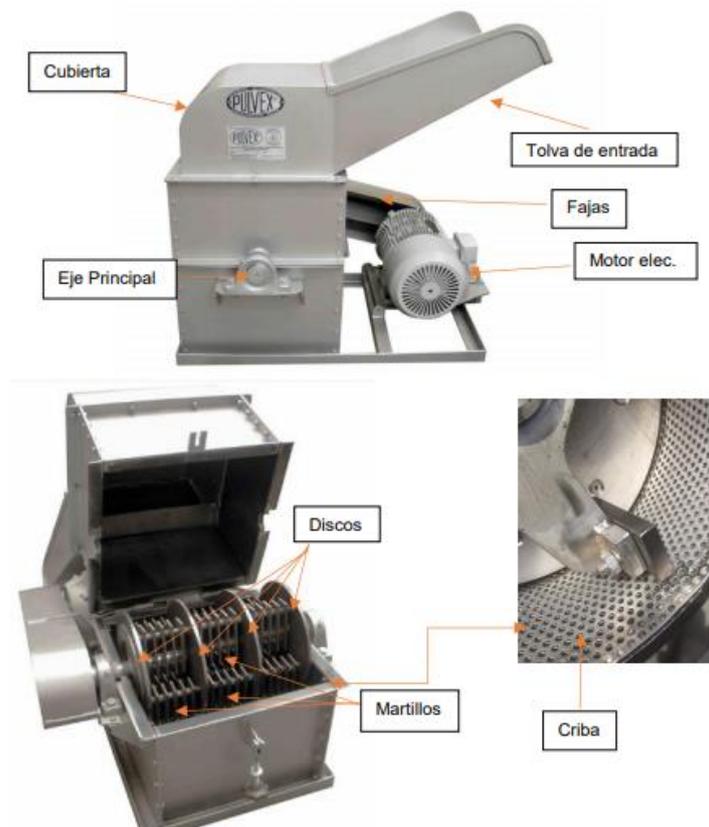


Figura 2.6. Partes principales del molino de martillos  
(Fuente: Pulvex MR, 2011)

### 2.5.1 Eje principal

Es un elemento rotativo constructivo, en la cual se encuentran acoplados los discos. La figura 2.7 muestra la disposición final del eje principal en el diseño del molino de martillos.

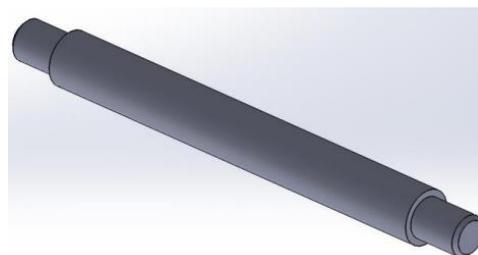


Figura 2.7. Eje principal del molino

### 2.5.2 Discos

Son elementos de separación que se encargan de relacionar el eje principal con los martillos, mediante 4 ejes que se posicionan paralelamente en los orificios correspondientes. La figura 2.8 muestra la disposición final de los discos en el diseño del molino de martillos.

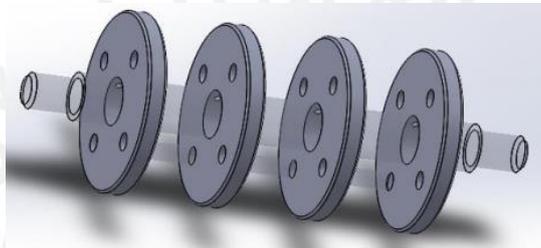


Figura 2.8. Discos acoplados al eje principal

### 2.5.3 Martillo

También llamado herramienta de percusión, es el elemento encargado del proceso de trituración mediante la transmisión de la fuerza de impacto hacia el material a triturar. Los martillos son elementos móviles, resistentes al desgaste y rotura. La figura 2.9 muestra la disposición final de los martillos en el diseño del molino de martillos.



Figura 2.9. Martillos del molino

### 2.5.4 Rejilla

También conocido como criba, es el elemento que se encuentra en la parte inferior del molino de martillos y su principal función es permitir el paso de las partículas trituradas que cumplan la condición de la granulometría final. Existen distintos tipos de rejillas de acuerdo al tamaño de orificio que posean. Para el presente proyecto se utiliza la malla Mesh 50. La figura 2.10 muestra la disposición de una rejilla para molino de martillos.

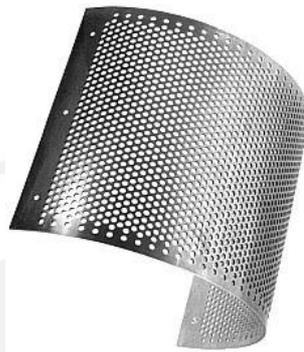


Figura 2.10. Rejilla o criba  
(Fuente: HETFEED)

## **2.6 Estado del arte del molino de martillos**

En el campo agroindustrial existen varias investigaciones sobre lo molino de martillos, por lo que en el presente apartado se muestra 2 investigaciones de Powder Technology y American Society of Agricultural and Biological Engineers respecto a un estudio comparativo entre el molino de martillos tradicional y las tecnologías actuales, así como un análisis de los parámetros del molino de martillos para 3 distintos materiales, los cuales son el pasto varilla, paja de trigo, y rastrojo de maíz.

### **2.6.1 Energía de trituración en molino de martillos**

Esta investigación desarrollada en el año 2009 muestra un análisis comparativo de los parámetros del molino de martillos, principalmente la energía mecánica, en un rango de operación de velocidades con ángulos de martillo de 90° y 30°. Para ello, se utilizaron para el análisis los siguientes materiales: pasto varilla, paja de trigo, y rastrojo de maíz. A continuación, se muestra los resultados con su respectivo análisis de la investigación.

#### **Efecto de la velocidad en la energía específica**

La figura 2.11 muestra el análisis entre la energía total específica y efectiva respecto a un rango de velocidades que van desde 1500 a 4000 RPM.

Por un lado, se puede determinar que la energía específica total promedio para el pasto varilla, paja de trigo, y rastrojo de maíz se incrementaron en un 37 y 45%, respectivamente, con un aumento en velocidad del molino de martillos de 2000 a 3600 rpm para martillos de 90°. Por otro lado, en caso de martillos de 30°, la energía específica del pasto varilla, paja de trigo, y rastrojo de maíz aumentó en 34%. Por lo tanto, hubo un aumento significativo (nivel de confianza del 95%) en la total energía mientras se trabaje con martillos de 30° en comparación con martillos de 90°.

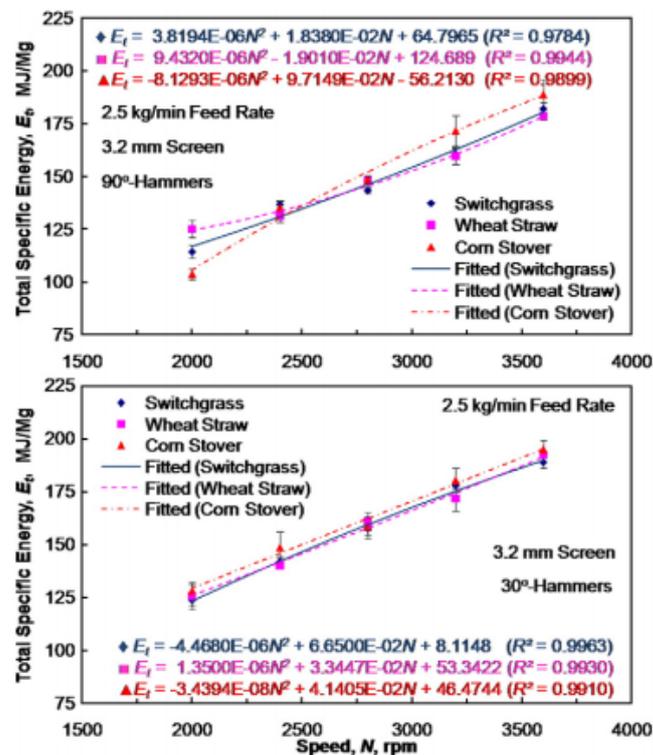


Figura 2.11. Energía total específica del pasto varilla, paja de trigo, y rastrojo de maíz con velocidad del molino de martillos para 90° y 30°  
(Fuente: POWDER TECHNOLOGY, 2009)

En síntesis, de acuerdo a los resultados de estas gráficas, se puede afirmar que el consumo de energía específica total del molino aumenta conforme se incrementa la velocidad; sin embargo, este incremento de consumo de energía se da en mayor proporción en los molinos de martillos con un ángulo de martillo de 90° que en uno con un ángulo de martillos de 30°. Por ende, una manera de reducir el consumo de energía y reducir costos es utilizar un molino de martillos con un ángulo de martillo menor a 90°.

Es decir, en el diseño de un molino de martillos es recomendable utilizar un ángulo de martillo de 45°, por ejemplo.

### **2.6.2 Estudio comparativo entre un tradicional y nuevo molino de martillos**

Esta investigación desarrollada en el año 2015 se encuentra destinada a determinar el efecto de determinadas características de diseño de molinos de martillos. Para ello, se realiza un análisis comparativo entre el diseño de los molinos de martillos tradicionales con las nuevas tecnologías que se utilizan en la actualidad.

Por un lado, los elementos esenciales de un molino de martillos convencional son el eje, martillo discos, motor, etc. El material ingresa por la tolva hacia el eje, en el cual es impactado por los martillos por lo que las partículas se mueven en trayectoria circular. Asimismo, debido a las fuerzas de impacto, el material fragmentado permanece en la cámara de molienda hasta que las partículas alcancen tamaños más pequeños que los agujeros del tamiz. Una desventaja del diseño tradicional de los molinos de martillos es su bajo rendimiento en relación con el consumo de energía. Esto se debe principalmente a la estructura del rotor, que está equipado con martillos que tienen la forma de placas rectangulares. Como resultado, debido al impacto de los martillos, las partículas se mueven dentro de la cámara de molienda y forman una fina capa giratoria en la circunferencia interior de la molienda cámara, con el resultado de que el material, a pesar de un grado suficiente de fragmentación, continúa circulando durante más tiempo antes de que pase por el tamiz. La figura 2.12 muestra el rotor de un molino de martillos tradicional con martillos en forma de placas rectangulares.

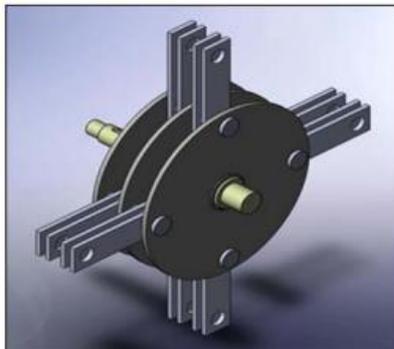


Figura 2.12. Rotor de un molino de martillos tradicional  
(Fuente: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015)

Por otro lado, la esencia del nuevo diseño es que el rotor tiene martillos pivotantes; es decir, posee un pasador que permite el giro de los martillos. Además, cada martillo tiene la forma de una sección circular y con un ángulo de martillo de al menos 35 °, y el punto de fijación del martillo coincide con el eje de simetría de la sección circular cerca de su base. Este diseño evita que las partículas de material fragmentado, cuando es golpeado por los martillos, se continúen moviendo en una trayectoria circular y formando un anillo giratorio. Por ende, las partículas se mueven aproximadamente radialmente con respecto al tamiz. Esto da como resultado una trayectoria más rápida del material a través del tamiz. La figura 2.13 muestra el diseño de un rotor con martillos en forma de sección circular con un ángulo de 45°.

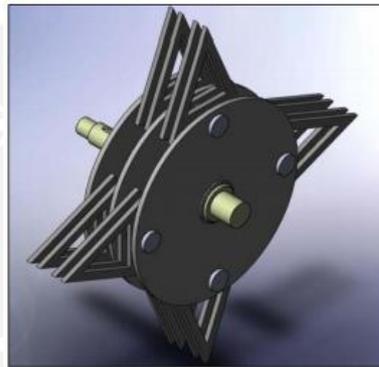


Figura 2.13. Rotor de un molino con martillos en forma circular  
(Fuente: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015)

Para llevar a cabo esta investigación se tomó como material de prueba al Triticale, debido a su amplio cultivo y uso como forraje. La tabla 2.2 muestra las propiedades físicas del material de prueba (Triticale).

Tabla 2.2. Propiedades físicas del material de prueba

<b>Table 1. Physical properties of the test material.</b>	
Property	Mean Value
Type of grain	Triticale
Variety	Winter variety Krakowiak
Length	7.7 mm
Width	3.54 mm
Thickness	2.32 mm
Equivalent diameter	3.40 mm
Bulk density	795.15 kg m <sup>-3</sup>
Mass density	849.20 kg m <sup>-3</sup>
Relative humidity	11.69%

(Fuente: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015)

A continuación, se muestra los resultados del diseño experimental para comparar los diseños nuevos de los rotores de molienda respecto a la tradicional. Para ello, se debe considerar las siguientes variables: ángulo de martillo ( $\alpha$ ), espacio de martillo ( $s$ ), diámetro de agujeros del tamiz ( $d$ ), velocidad periférica del martillo ( $v$ ), rendimiento del molino de martillos ( $W$ ) y el consumo de energía específico ( $E$ ). La tabla 2.3 muestra los valores de las variables se utilizarán la realizar el experimento, de los cuales la principal variable es el ángulo de martillo ( $\alpha$ ), la cual presenta 4 valores.

Tabla 2.3. Valores de las variables del ensayo

**Table 2. Summary of the independent variables.**

Independent Variables	Values				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$\alpha$ (degrees)	0	35	45	55	-
$s$ (mm)	10	15	20	-	-
$d$ (mm)	3	5	-	-	-
$v$ ( $m\ s^{-1}$ )	38	45	52	59	66

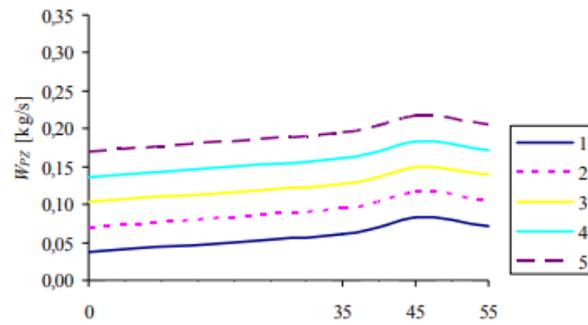
(Fuente: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015)

Las variables de la tabla influyen, principalmente, en el rendimiento y el consumo de energía específico del molino de martillos. A continuación, se muestran los efectos de estas variables mencionadas sobre el rendimiento y el consumo de energía específico.

### 2.6.2.1 Rendimiento de molino de martillos

Como resultado de los análisis realizados, se obtiene la gráfica de la figura 2.14, la cual muestra el rendimiento del molino para diferentes valores de ángulo de martillo ( $\alpha$ ), velocidad periférica de martillo ( $v$ ), un espacio de martillo ( $s$ ) de 15 mm y un diámetro de agujero del tamiz ( $d$ ) de 3 mm.

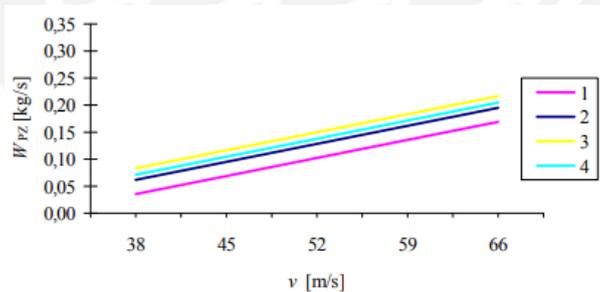
Por un lado, la gráfica muestra que para un ángulo de martillo ( $\alpha$ ) de  $45^\circ$  se obtiene el mayor rendimiento, mientras que para los martillos rectangulares ( $0^\circ$ ) se tiene el menor rendimiento. Para este caso, el rendimiento con un  $\alpha$  de  $45^\circ$  es, aproximadamente, 28% más que con un  $\alpha$  de  $0^\circ$  para la mayor velocidad periférica de martillo ( $v= 66\ m/s$ ) y un diámetro de agujero de tamiz ( $d$ ) de 3 mm.



1		2		3		4		5	
$\alpha$	v								
0	38	0	45	0	52	0	59	0	66
35	38	35	45	35	52	35	59	35	66
45	38	45	45	45	52	45	59	45	66
55	38	55	45	55	52	55	59	55	66

Figura 2.14. Efecto del ángulo de martillo sobre el rendimiento para 5 valores diferentes de velocidad periférica  
(Fuente: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015)

Por otro lado, la figura 2.15 muestra el efecto de la velocidad periférica de martillo ( $v$ ) sobre el rendimiento del molino para distintos valores de ángulo de martillo ( $\alpha$ ), un espacio de martillo ( $s$ ) de 15 mm y un diámetro de agujero de tamiz ( $d$ ) de 3 mm. De la gráfica se puede deducir que el rendimiento del molino se incrementa conforme se aumenta la velocidad de rotación periférica del martillo ( $v$ ).



1		2		3		4	
$\alpha$	v	$\alpha$	v	$\alpha$	v	$\alpha$	v
0	38	35	38	45	38	55	38
0	45	35	45	45	45	55	45
0	52	35	52	45	52	55	52
0	59	35	59	45	59	55	59
0	66	35	66	45	66	55	66

Figura 2.15. Efecto de la velocidad periférica sobre el rendimiento para 5 valores diferentes de ángulo de martillo  
(Fuente: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015)

En conclusión, de los resultados de estas gráficas, se puede afirmar que el ángulo de martillo ( $\alpha$ ) y la velocidad periférica del extremo del martillo ( $v$ ) tienen un efecto importante en el rendimiento del molino de martillos, de tal manera que el mayor rendimiento del molino se logra con un ángulo de martillo de  $45^\circ$ .

### 2.6.2.2 Consumo de energía específica

De la misma manera al rendimiento del molino, como resultado de los análisis realizados, se obtiene la figura 2.16, la cual muestra la dependencia del consumo de energía específico en el ángulo de martillo ( $\alpha$ ) para distintos valores de velocidad periférica de martillo ( $v$ ), un espacio de martillo ( $s$ ) de 15 mm y un diámetro de agujero de tamiz ( $d$ ) de 3 mm. De la gráfica se deduce que el valor mínimo del consumo de energía específica del molino se da con un ángulo de martillo ( $\alpha$ ) de  $45^\circ$ , mientras que el valor más alto ocurre en los martillos rectangulares con un ángulo de martillo ( $\alpha$ ) de  $0^\circ$ .

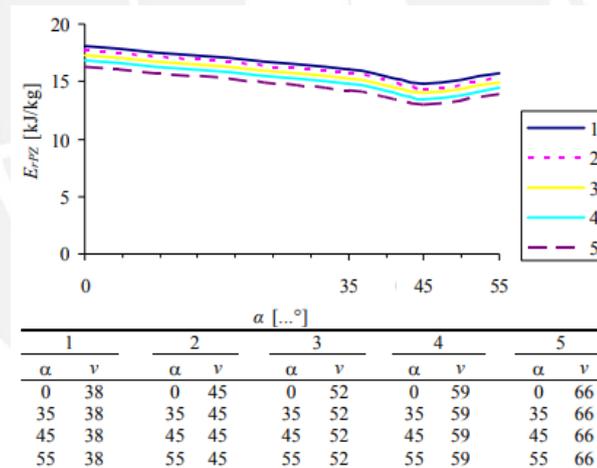
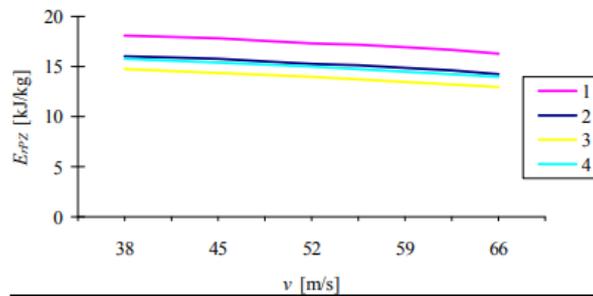


Figura 2.16. Efecto del ángulo de martillo sobre el consumo de energía específico para 5 valores diferentes de velocidad periférica (Fuente: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015)

Asimismo, la figura 2.17 muestra el efecto de la velocidad periférica de martillo ( $v$ ) sobre el consumo de energía específico para diferentes valores de ángulo de martillo ( $\alpha$ ), un espacio de martillo ( $s$ ) de 15 mm y un diámetro de agujero de tamiz ( $d$ ) de 3 mm. De la gráfica, se deduce que el menor consumo de energía específico le corresponde a la mayor velocidad periférica de martillo ( $v$ ); es decir, 66 m/s.



v [m/s]							
1		2		3		4	
$\alpha$	v	$\alpha$	v	$\alpha$	v	$\alpha$	v
0	38	35	38	45	38	55	38
0	45	35	45	45	45	55	45
0	52	35	52	45	52	55	52
0	59	35	59	45	59	55	59
0	66	35	66	45	66	55	66

Figura 2.17. Efecto de la velocidad periférica de martillo sobre el consumo de energía específico para 5 valores diferentes de ángulo de martillo (Fuente: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015)

En síntesis, de los resultados de estas gráficas, se puede afirmar que el ángulo de martillo ( $\alpha$ ) y la velocidad periférica del extremo del martillo ( $v$ ) tienen un efecto importante en el consumo de energía específico del molino de martillos, de tal manera que el menor consumo de energía del molino se logra con un ángulo de martillo de  $45^\circ$ .

## Capítulo 3

Este capítulo abarca la propuesta de una metodología para el dimensionamiento de los principales componentes de un molino de martillos tales como los martillo, el disco porta-martillo, el perno porta-martillo y el eje principal. Asimismo, se desarrolla la propuesta de una metodología de ensayo para determinar la fuerza de ruptura de la hoja de caña y con ello dimensionar los martillos del molino.

### 3 Metodología para el dimensionamiento de un molino de martillos

Se realiza una metodología para el diseño de los principales componentes de un molino de martillos considerando las principales propiedades físicas y químicas que poseen las hojas de caña. Para comenzar con el dimensionamiento del molino, es necesario realizar un ensayo de impacto para poder determinar la energía de ruptura del material. Luego, se procede a dimensionar los principales componentes mecánicos del molino tales como los martillos, discos, eje principal, etc.

#### 3.1 Metodología para determinación experimental de la energía de ruptura de las hojas de caña

Para llevar a cabo el diseño de un molino de martillos, se necesita el valor de la energía de ruptura de las hojas de caña, para el dimensionamiento de los martillos. Sin embargo, tras no hallar una fuente fiable para este valor, se busca estimar esta información de manera experimental. Por ello, el experimento se realiza utilizando un ensayo de impacto en caída libre de un objeto metálico sobre una muestra de hoja de caña.

A continuación, se muestra los procedimientos empleados para la determinación experimental de la energía de ruptura de las hojas de caña:

##### a) Objetivo

- ✓ Determinar experimentalmente el valor de la energía de ruptura de las hojas de caña de azúcar.

##### b) Equipos e instrumentos a utilizar

- ✓ 1 balanza digital con capacidad de hasta 5 kg y de aproximación de 0.001 kg.
- ✓ 1 objeto metálico (esfera) de 0.6 kg.
- ✓ 1 chaveta de corte manual.
- ✓ 1 wincha métrica con capacidad de medición de hasta 1 m y aproximación de 1 mm.
- ✓ 2 kg de hojas de caña divididos en 100 trozos de dimensiones similares entre ellas con intervalos de longitud de 1 y 2 cm.
- ✓ 1 vernier universal estándar con aproximación de 0.1 mm.
- ✓ Superficie metálica de dimensiones 40 x 40 cm

### **c) Procedimiento del ensayo**

El ensayo consiste en dejar caer un objeto metálico sobre las hojas de caña que se encuentran sobre una superficie metálica desde varias alturas hasta poder evidenciar una ruptura del material. A continuación, se describe detalladamente los pasos a seguir:

- ✓ En primer lugar, dividir la masa total de las hojas de caña (2kg) en 4 partes iguales utilizando el método de cuarteo y definir estas partes por lotes de muestra con las letras A, B, C y D.
- ✓ Luego, seleccionar aleatoriamente 2 de los 4 lotes de muestra para realizar el experimento. Por ejemplo, los lotes A y C.
- ✓ Después, acondicionar los lotes de muestra en trozos de hoja según las dimensiones requeridas, las cuales son de 1 y 2cm. En cada lote de muestra, se debe tener 25 trozos de hoja de caña con una masa de aproximadamente 20 g por cada trozo.
- ✓ Asimismo, preparar el resto de los materiales a utilizar en el experimento tales como la esfera metálica, la wincha métrica, la superficie metálica y la balanza digital.
- ✓ Verificar que la masa de la esfera metálica y de los trozos de las hojas de caña cumplan con los requerimientos establecidos. El valor de la masa de 0.6 kg a lanzar se define para tener una mejor apreciación de la ruptura del material y no dañar la superficie metálica al momento del impacto

- ✓ Luego, proceder a dejar caer el objeto metálico sobre el material de prueba, la cual se encuentra sobre una superficie metálica, comenzando con una altura de 10 cm. Se elige una altura de prueba inicial de 10 cm, ya que es poco significativa para la fragmentación de un material como las hojas de caña, por lo que se puede iniciar el experimento a esta altura. También, se elige una superficie metálica para que el material de prueba absorba toda la energía del impacto de la esfera y no exista deformación en la superficie.
- ✓ Después, repetir el ensayo 25 veces en cada lote de muestra analizado incrementando la altura en 1cm por cada ensayo que se realiza hasta lograr obtener la altura en la que el material se fractura. Este incremento de 1 cm es para obtener la altura de fragmentación más aproximada.
- ✓ Asimismo, teniendo las 2 alturas de ruptura del material en los lotes de muestra A y C, respectivamente, calcular la altura promedio de ruptura del material (siempre que las alturas de ruptura de los lotes A y C sean distintas)
- ✓ Finalmente, almacenar estos datos para poder determinar la velocidad de impacto y la energía de ruptura del material.

La figura 3.1 muestra un esquema del ensayo a realizar.

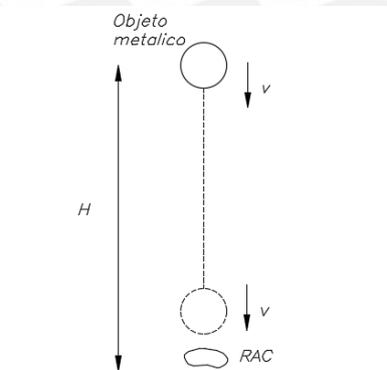


Figura 3.1. Esquema del ensayo de impacto  
(Fuente: Elaboración propia)

#### d) Cálculos

Para el procedimiento descrito anteriormente, se pide lo siguiente:

- ✓ Determinar la energía de ruptura o fractura ( $E_R$ ). del material de prueba.
- ✓ Determinar la velocidad del objeto metálico ( $v_i$ ) cuando impacta sobre el material de prueba y lo fragmenta.

### e) Hoja de resultados

Para que los resultados tengan un alto nivel de confianza se realizan 25 ensayos con dos repeticiones para los lotes A y C. Luego, se puede organizar los datos obtenidos del ensayo experimental tal y como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Cuadro de resultados del experimento

N° Ensayo	Lote de muestras A	Lote de muestras B	Lote de muestras C	Lote de muestras D	Altura de prueba Lote A (HA)	Altura de prueba Lote C (HC)
1	A1	B1	C1	D1	H1A	H1C
2	A2	B2	C2	D2	H2A	H2C
3	A3	B3	C3	D3	H3A	H3C
4	A4	B4	C4	D4	H4A	H4C
5	A5	B5	C5	D5	H5A	H5C
6	A6	B6	C6	D6	H6A	H6C
7	A7	B7	C7	D7	H7A	H7C
8	A8	B8	C8	D8	H8A	H8C
9	A9	B9	C9	D9	H9A	H9C
10	A10	B10	C10	D10	H10A	H10C
11	A11	B11	C11	D11	H11A	H11C
12	A12	B12	C12	D12	H12A	H12C
13	A13	B13	C13	D13	H13A	H13C
14	A14	B14	C14	D14	H14A	H14C
15	A15	B15	C15	D15	H15A	H15C
16	A16	B16	C16	D16	H16A	H16C
17	A17	B17	C17	D17	H17A	H17C
18	A18	B18	C18	D18	H18A	H18C
19	A19	B19	C19	D19	H19A	H19C
20	A20	B20	C20	D20	H20A	H20C
21	A21	B21	C21	D21	H21A	H21C
22	A22	B22	C22	D22	H22A	H22C
23	A23	B23	C23	D23	H23A	H23C
24	A24	B24	C24	D24	H24A	H24C
25	A25	B25	C25	D25	H25A	H25C
Altura de ruptura					H21A	H22C
Altura promedio de ruptura					$(H21A+H22C) / 2$	

(Fuente: Elaboración propia)

A continuación, la figura 3.2 muestra el diagrama de flujo empleado para la secuencia de cálculo proveniente del ensayo.

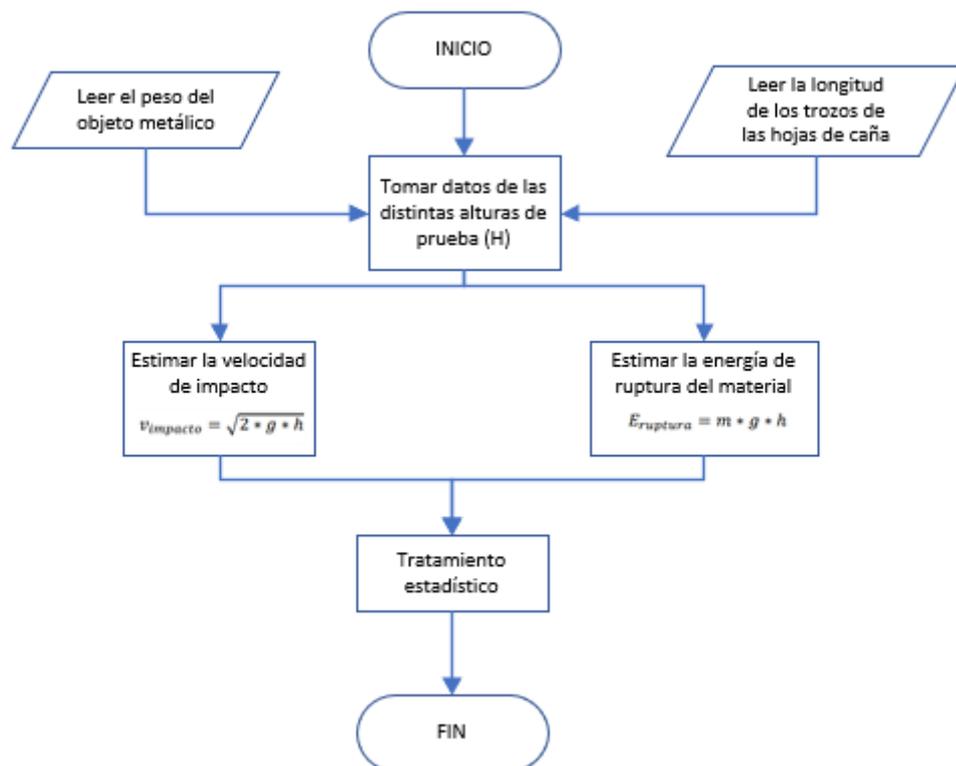


Figura 3.2. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del ensayo de impacto  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.2 Dimensionamiento de los martillos

La metodología que se emplea para el dimensionamiento de los martillos es la que se muestra en la figura 3.3.

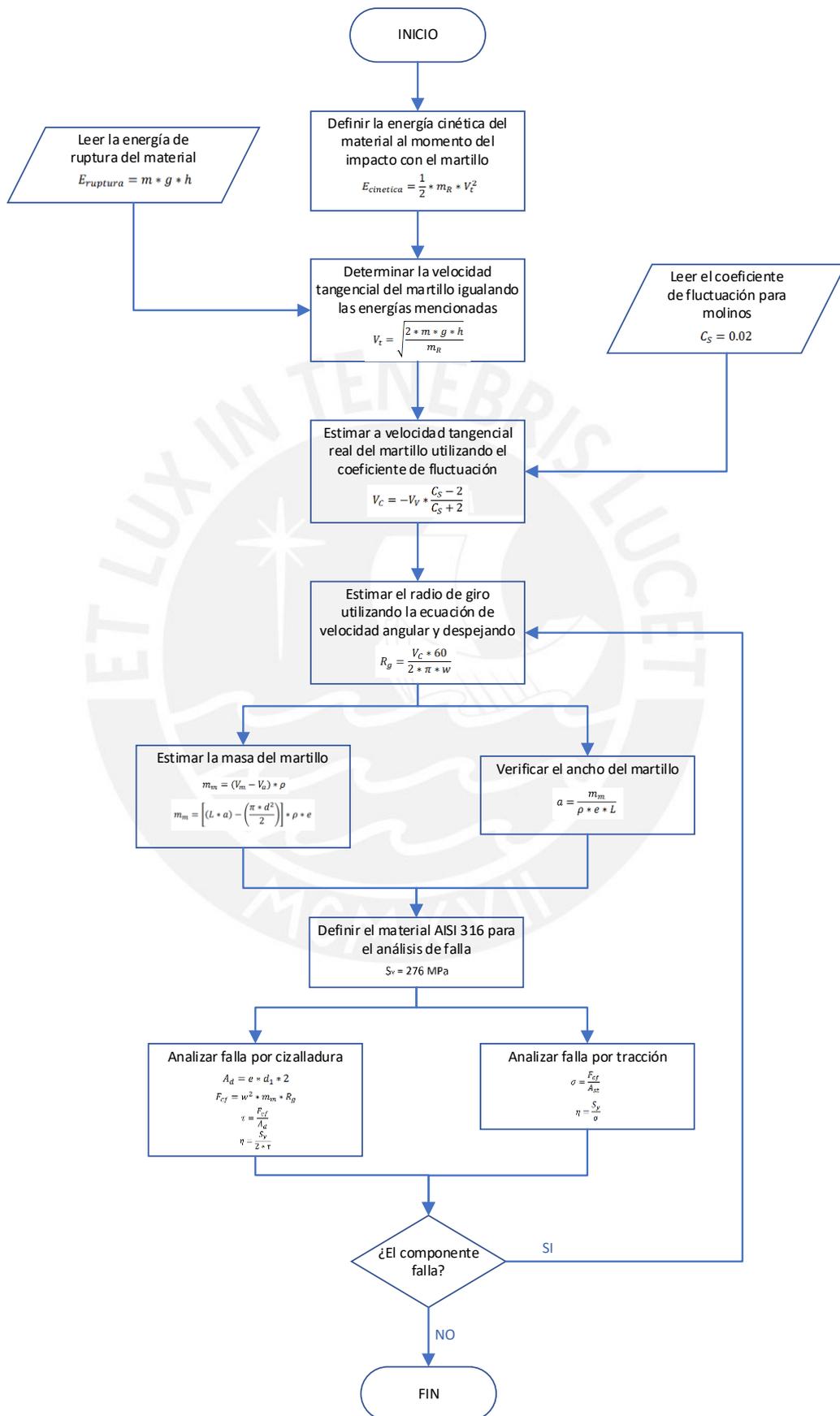


Figura 3.3. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del dimensionamiento del martillo  
(Fuente: Elaboración propia)

Se comienza tomando la energía de ruptura del material que se determinó en el ensayo de impacto e igualando a la energía cinética del material en el momento que impacta con el martillo para poder despejar la velocidad tangencial del martillo en vacío. Luego, se utiliza un coeficiente de fluctuación para poder determinar la velocidad tangencial del martillo a plena carga (en funcionamiento), y con ello se puede estimar el radio de giro que limita el tamaño del molino. Después, con el radio de giro, se estima las dimensiones del martillo y se corrobora su masa y su ancho. Finalmente, se define el material (AISI 316) para realizar el análisis de falla por cizalladura y tracción para corroborar que el componente no falle. Si no es así, se modifica las dimensiones del martillo (de acuerdo al radio de giro) y se repite el cálculo de análisis de falla por cizalladura y tracción hasta corroborar que el componente no falle durante su operación.

### **3.3 Dimensionamiento del disco porta-martillos**

La metodología que se emplea para el dimensionamiento del disco porta-martillos es la que se muestra en la figura 3.4.

Se comienza realizando algunas consideraciones previas en el dimensionamiento del disco tales como el diámetro del disco ( $D$ ), diámetro de los agujeros del pasador ( $d_1$ ) y el diámetro de agujero para el eje principal ( $d_2$ ). Asimismo, se define el material a utilizar (AISI 316) y se determina el espesor del disco. Finalmente, se verifica si el factor de seguridad del componente es el adecuado para garantizar que el elemento no falle. Si no es así, se modifica las consideraciones iniciales y se repite el cálculo para determinar el espesor del disco y su factor de seguridad hasta corroborar que el elemento no falle durante su operación.

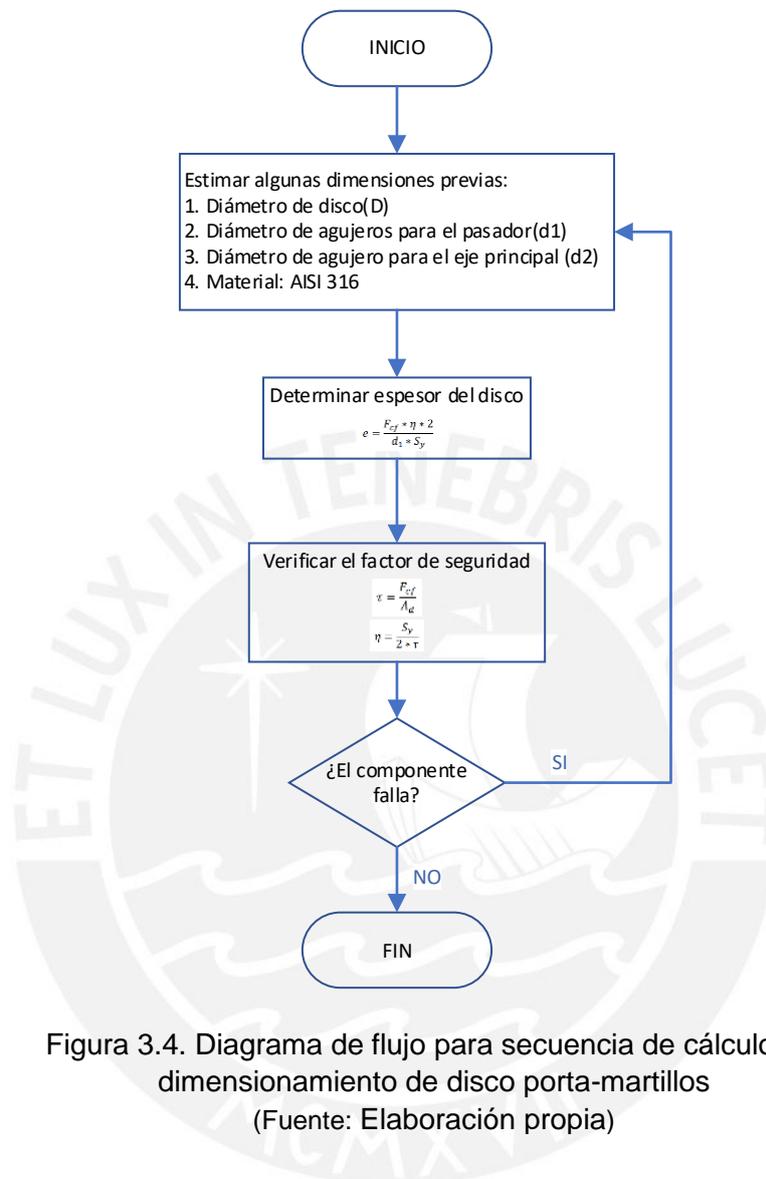


Figura 3.4. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del dimensionamiento de disco porta-martillos (Fuente: Elaboración propia)

### 3.4 Dimensionamiento del perno porta-martillos

La metodología que se emplea para el dimensionamiento del perno porta-martillos es la que se muestra en la figura 3.5.

Se comienza definiendo el diámetro del perno a utilizar y el material del cual se va a fabricar. Luego, se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del perno para poder realizar un equilibrio estático y determinar las fuerzas a las que está sometidas. Una vez determinadas todas las fuerzas y reacciones, se procede a graficar los diagramas de fuerza cortante y momento flector para localizar la zona crítica. Finalmente, se verifica el factor de seguridad con el máximo esfuerzo normal y de corte.

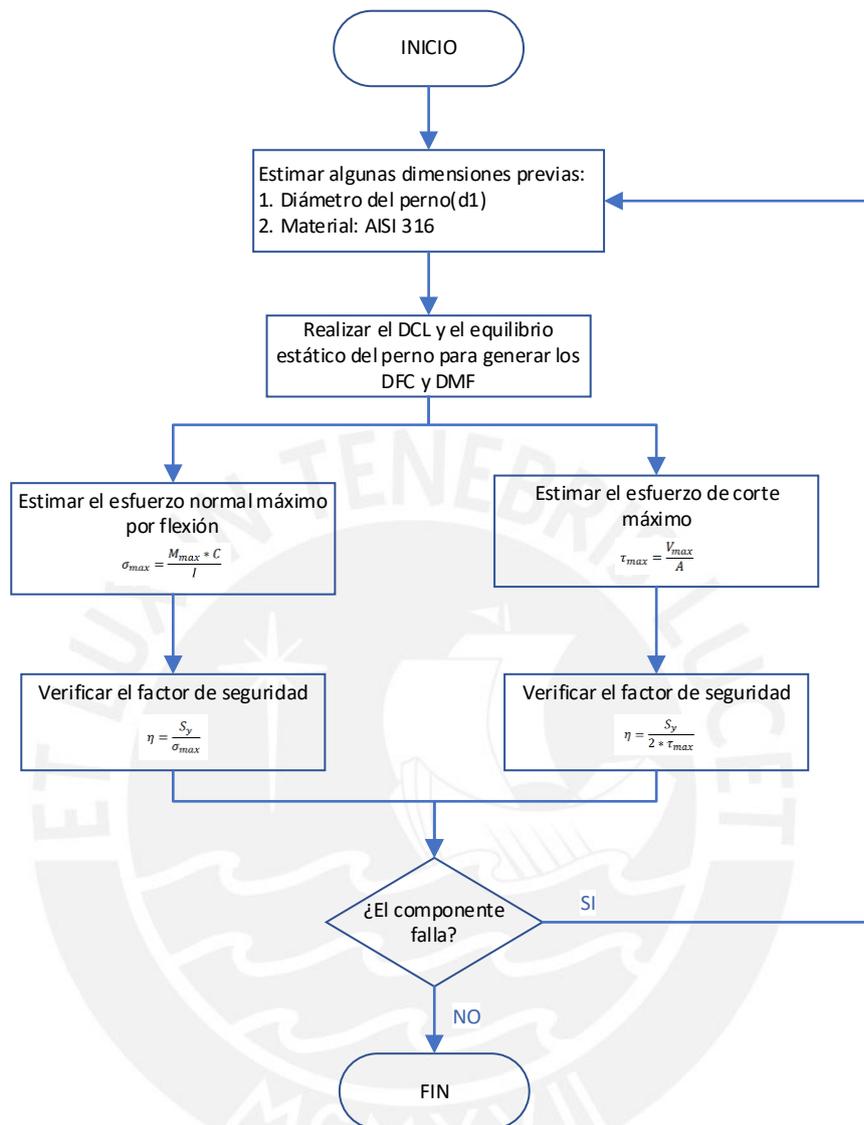


Figura 3.5. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del dimensionamiento del perno porta-martillos (Fuente: Elaboración propia)

### 3.5 Dimensionamiento del eje principal

La metodología que se emplea para el dimensionamiento del perno porta-martillos es la que se muestra en la figura 3.6.

Se comienza determinando el peso total de los componentes que actúan sobre el eje, de tal manera que podamos ubicar este peso como una carga distribuida sobre el eje. Luego, se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del eje principal para poder realizar

el equilibrio estático y poder determinar las reacciones de los soportes. Una vez determinadas las reacciones, se procede a graficar los diagramas de fuerza cortante y momento flector para localizar la zona crítica. Después, se determina la resistencia real a la fatiga y el esfuerzo alternante de flexión. Finalmente, se reemplaza estos valores en la ecuación de Goodman y se estima el diámetro necesario en la zona crítica del eje.

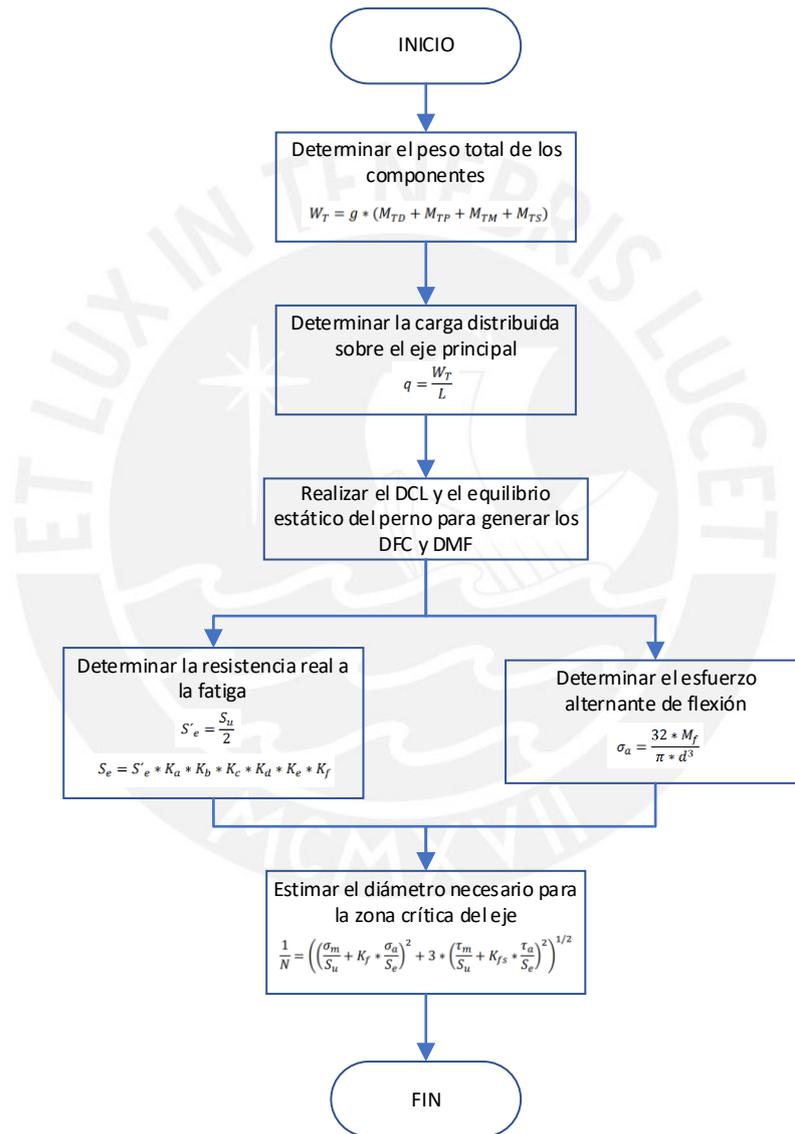


Figura 3.6. Diagrama de flujo para secuencia de cálculo del dimensionamiento del eje principal  
(Fuente: Elaboración propia)

## Conclusiones

- Según las nuevas tecnologías analizadas del artículo de “American Society of Agricultural and Biological Engineers” en los molinos de martillos, se concluye que en el diseño de los martillos debe existir un ángulo de martillo menor de  $90^\circ$  para mejorar el rendimiento de la máquina y disminuir el consumo de energía. Además, su velocidad tangencial debe ser lo mayor posible para mejorar el rendimiento del equipo, puesto que a mayor velocidad tangencial aumenta la fuerza de impacto sobre el material.
- Según el artículo “A COMPARATIVE STUDY OF NEW AND TRADITIONAL DESIGNS OF A HAMMER MILL”, respecto a la distancia entre el martillo y el tamiz o malla, se concluye que no debe ser superior a los 15 mm ya que a partir de esta distancia el rendimiento del molino empieza a decrecer, puesto que el material tendrá mayor distancia de recorrido al ser impactado.
- De acuerdo a la metodología para la determinación de la energía de ruptura de las hojas de caña realizado en el capítulo 3, se concluye que la cantidad de pruebas tomadas debe ser superior a las 20 veces, puesto este valor nos permite tener un nivel de confianza del 95%.
- Para la metodología del dimensionamiento del martillo, se utiliza la fuerza de ruptura que se halla en el ensayo experimental del capítulo 3, y se verifica si falla por cizalladura y tracción para que el componente no falle durante su operación. Asimismo, se concluye que la mejor disposición para los martillos es colocarlos en posiciones  $90^\circ$  entre sí, puesto que se tiene un mejor balanceo dinámico y el esfuerzo normal por tracción resulta menor.
- Para la metodología del dimensionamiento del eje principal, se verifica la resistencia real por fatiga y el esfuerzo alternante por flexión utilizando el criterio de Von Mises y con ello verificar que el componente no fallará durante su funcionamiento.

## Bibliografía

- American Society of Agricultural and Biological Engineers  
2015 A COMPARATIVE STUDY OF NEW AND TRADITIONAL DESIGNS OF A HAMMER MILL. Consulta: 30 de octubre del 2020.  
  
file:///C:/Users/HP/Documents/ASABErozdrabniacz.pdf
- ASSUREIRA, Estela  
s/f POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN EL PERÚ.  
Consulta: 3 de octubre del 2020.  
  
<http://conferencia2013.consortio.edu.pe/wp-content/uploads/2014/09/3.-Assureira.pdf>
- BIOMASS AND ENERGY  
2015 Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws. Consulta: 26 de octubre del 2020.  
  
<https://bioenergy.inl.gov/Journal%20Articles/Grinding%20energy%20and%20physical%20properties%20of%20chopped%20and%20hammer%20milled%20barley,%20wheat,%20oat,%20and%20canola%20straw.pdf>
- CENGICAÑA  
2017 Potencial de los Residuos Agrícolas de Cosecha de Caña de Azúcar, como un biocombustible. Consulta: 3 de octubre del 2020.  
  
file:///C:/Users/HP/Downloads/Muoz2017.Potencialdelosresiduosagricola sdelacosechacomobiocombustible-ATACA2017.pdf
- CUADRADO, Rafael, RUEDA, José  
2009 Diseño y construcción de un molino de martillos. Consulta: 2 de octubre del 2020.  
  
<http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1126/1/91259.pdf>
- FAO  
Parámetros y unidades. Consulta: 2 de octubre del 2020.  
  
<http://www.fao.org/3/j0926s/J0926s06.htm>
- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, Aracelia  
s/f El bagazo de la caña de azúcar: propiedades, constitución y potencial. Consulta: 10 de octubre del 2018.

<[http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS\\_TECNICAS/032/New/Documentaci%C3%B3n/Parte%20V/Parte%20V.pdf](http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS_TECNICAS/032/New/Documentaci%C3%B3n/Parte%20V/Parte%20V.pdf)>

- ICIDCA  
2013 Paja de la caña de azúcar: Sus usos en la actualidad. Consulta: 5 de octubre del 2020.  
<https://www.redalyc.org/pdf/2231/223128548003.pdf>
- INTA  
s/f La caña de azúcar como cultivo energético. Consulta: 5 de octubre del 2020.  
[https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-la-cana-de-azucar-como-cultivo-energetico\\_2](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-la-cana-de-azucar-como-cultivo-energetico_2)
- OBERNBERGER, Ingwald, BRUNNER, Thomas y BÄRNTHALER, Georg  
2006 Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. Consulta: 3 de octubre del 2020.  
<https://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-ChemicalPropertiesSolidBiofuels-Leipzig-2005-10-07.pdf>
- ONOFRE, Miguel  
2012 Metodología para la determinación indirecta del índice de Bond en tamaño de partículas ultrafinos Gijón: Universidad de Oviedo. Consulta: 12 de octubre de 2020.  
[https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/13449/TD\\_miguelonofrefernandez.pdf;jsessionid=E563E4C00D4E84A8695344F6D4EA3442?sequence=2](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/13449/TD_miguelonofrefernandez.pdf;jsessionid=E563E4C00D4E84A8695344F6D4EA3442?sequence=2)
- ORTEGA-RIVAS, E.  
2005 Handling and Processing of Food Powders and Particulars. Capítulo 4 “Encapsulated and Powdered Foods”. USA: CRS Press.
- PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
2013 “Biomasa: 10 millones de toneladas de residuos pueden ser usados como biocombustible”. .edu. Lima, 13 de octubre del 2018. Consulta: 26 de noviembre del 2018.  
<https://puntoedu.pucp.edu.pe/noticias/utilizacion-residuos-industriales-biocombustible/>

- **POWDER TECHNOLOGY**  
2009 Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions. Consulta: 28 de octubre el 2020  
  
<http://www.biomasslogistics.org/Publications/Venkata3.pdf>
- **REVISTA INDUSTRIAL Y AGRICOLA DE TUCUMAN**  
2015 Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán. Consulta: 2 de octubre del 2020.  
  
<file:///C:/Users/HP/Downloads/v92n2a04.pdf>
- **TYMOSZUK, Mateusz, MROCZEK, Kazimierz, KALISZ, Sylwester**  
2019 An investigation of biomass grindability. Consulta: 12 de enero de 2021.  
  
<file:///C:/Users/HP/Downloads/Aninvestigationofbiomassgrindability.pdf>

