



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Optimización del martillo de un molino para reducir el consumo de potencia en la molienda de bagazo de caña panelera.**

**Sneider Alejandro Gil Parra**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de minas, Departamento de Ingeniería Mecánica  
Medellín, Colombia  
2019



# **Optimización del martillo de un molino para reducir el consumo de potencia en la molienda de bagazo de caña panelera.**

**Sneider Alejandro Gil Parra**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

Maestría en Ingeniería Mecánica

Director (a):

PhD. Albeiro Espinosa Bedoya

Codirector (a):

PhD. Hector José Ciro Velasquez

Línea de Investigación:

Optimización y Diseño Computacional

Grupo de Investigación:

DIMEC

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de minas, Departamento de Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2019



## **Agradecimientos**

Por el apoyo incondicional en la realización de este trabajo agradezco a mi familia, a mis amigos y a mi novia Laura Estrada; a mi director de tesis Albeiro Espinosa, a mi codirector Héctor José Ciro, y a mi amiga Diana Melisa Dominguez por asesorarme durante este proceso, y finalmente a la fundación Funmabi (Fundación manos abiertas para dar), en especial a su presidente honorario, Juan Fernando Hoyos, no solo por la ayuda económica, sino también por su apoyo en este proyecto y ayudarme en el crecimiento de éste.



## Resumen

En la agroindustria colombiana, el sector panelero ocupa el segundo lugar y a nivel mundial es el segundo productor de panela, después de la India, pero a pesar de ello, sólo el 2% de la industria de todo el país posee alta tecnificación, en su mayoría es un proceso artesanal altamente ineficiente, además de generar contaminación en ríos y bosques, por este motivo, una propuesta para reducir estos problemas es pelletizar el bagazo, ya que así tiene mayor poder calorífico y se puede llevar a otras aplicaciones.

El primer aspecto abordado fue la selección de una máquina que pueda triturar el bagazo de caña de azúcar hasta dejarlo en polvos finos, para luego comprimirlos en una pelletizadora, para obtener los pellets. Para tal proceso, se caracterizaron diversos molinos y trituradoras usados en la agroindustria, obteniendo finalmente como resultado, que el molino de martillos era el más apropiado para ese propósito.

Al igual que la mayoría de las máquinas agrícolas, el molino de martillos posee problemas como: alto nivel de polución, alta generación de ruidos y la más notable de todas, un alto consumo de potencia eléctrica y baja eficiencia de molido; Pero, estudios previos han demostrado que cambios geométricos en las herramientas de corte ayudan a reducir el consumo de potencia y aumentar la eficiencia de corte. Por este motivo, el propósito de esta tesis es optimizar los martillos del molino.

Para hacer tal proceso se inicia buscando un modelo el cual describa el proceso de molienda de manera cinemática, es por ello que se llegó que el modelo que mejor se adecúa es el de Lagrange, debido a la relación existente entre el martillo y el tambor. Para la validación tal modelo, se hizo de manera experimental, a través de un proceso el cual consistía en someter la máquina inicialmente sin ningún tipo de carga, luego con diversas cargas que se fueron triturando en un periodo de tiempo regulado. Durante este proceso se detectó los momentos los más críticos, los cuales se tomaron como base para la elaboración del proceso de optimización.

Basado en el modelo obtenido y en los puntos críticos se definió la ecuación objetivo y las restricciones, obteniendo un resultado geométrico de martillos, los cuáles se fabricaron, se ensamblaron en el molino de martillos, luego se somete la máquina a los mismos experimentos que se hicieron para la elaboración y verificación del modelo, llegando como resultado a una reducción en el consumo de potencia eléctrica en un 51% operando bajo las mismas condiciones cinemáticas, cinéticas y de carga de bagazo, que se hacía usando martillos convencionales, además de un aumento en producción de polvos finos en un 51%.

**Palabras clave: Molino De Martillos, Optimización, Martillos, Pelletización, Caña Panelera, Eficiencia de corte.**

## Abstract

In Colombian agricultural business, the panela sector occupies the second place and worldwide is the second producer of panela, after India, but despite this, only 2% of the industry throughout the country has high technology, in its The majority is a highly inefficient artisanal process, in addition to generating pollution in rivers and forests, for this reason, a proposal to reduce these problems is to pelletize the bagasse, since it thus has greater calorific power and can be taken to other applications.

The first aspect addressed was the selection of a machine that can crush the sugarcane bagasse until it is left in fine powders, then compressed into a pelletizer, to obtain the pellets. For such a process, several mills and crushers used in agribusiness were characterized, finally obtaining, as a result, that the hammer mill was the most appropriate for that purpose.

Like most agricultural machines, the hammer mill has problems such as: high level of pollution, high noise generation and the most notable of all, high power consumption and low milling efficiency; But previous studies have shown that geometric changes in cutting tools help reduce power consumption and increase cutting efficiency. For this reason, the purpose of this thesis is to optimize the hammers of the mill.

To do such a process, we start looking for a model which describes the grinding process in a kinematic way, which is why it was arrived that the model that best suits is that of Lagrange, due to the existing relationship between the hammer and the drum. For the

validation of this model, it was done experimentally, through a process which consisted of submitting the machine initially without any load, then with various loads that were crushed in a regulated period of time. During this process the most critical moments were detected, which were taken as the basis for the elaboration of the optimization process.

Based on the model obtained and the critical points, the objective equation and restrictions were defined, obtaining a geometric result of hammers, which were manufactured, assembled in the hammer mill, then the machine is subjected to the same experiments as they made for the elaboration and verification of the model, resulting in a reduction in the consumption of electric power by 51% operating under the same kinematic, kinetic and bagasse load conditions, which was done using conventional hammers, in addition to an increase in production of fine powders by 51%.

**Keywords: Hammermill, Optimization, Hammers, Pelletization, Sugarcane, Cutting Efficiency**

# Contenido

	Pág.
<b>1. Capítulo 1: Planteamiento del problema .....</b>	<b>6</b>
1.1 Introducción .....	6
1.2 Problema de Investigación .....	7
1.3 Justificación .....	8
1.4 Hipótesis .....	9
1.5 Objetivos .....	10
1.5.1 Objetivo General .....	10
1.5.2 Objetivos Específicos .....	10
<b>2. Capítulo 2: Estado de arte .....</b>	<b>11</b>
2.1 Introducción .....	11
2.2 Tipos de molinos .....	12
2.2.1 Molino de platos .....	12
2.2.2 Trituradoras giratorias .....	13
2.2.3 Trituradora de mandíbulas .....	15
2.2.4 Trituradora de rodillos .....	17
2.2.5 Molinos de rodillos .....	18
2.2.6 Molinos de martillos .....	20
2.2.7 Molino de tornillo sin fin .....	23
2.2.8 El molino de bolas .....	25
2.2.9 Órgano de corte de eje vertical para rastrojo .....	27
2.2.10 Molinos Forrajeros De Tambor .....	29
2.2.11 Molino de agujas .....	31
2.3 Discusión .....	33
2.4 Análisis de estudios previos de molinos de martillos .....	41
<b>3. Capítulo 3: Modelamiento matemático del martillo .....</b>	<b>59</b>
3.1 Introducción .....	59
3.2 Descripción del molino de martillos .....	59
3.3 Caracterización de la potencia del molino de martillos con respecto a la carga .....	62
3.3.1 Materiales .....	63
3.3.2 Metodología .....	67
3.3.3 Resultados .....	70
3.3.4 Discusión .....	77
3.4 Modelo del molino de martillos funcionando sin carga .....	79
3.5 Modelo del molino de martillos funcionando con carga .....	87
3.5.1 Experimento para obtener valor número del coeficiente de restitución .....	88
3.5.2 Modelo matemático que describe el tiempo el cual ocurre el impacto entre el martillo y el bagazo de caña de azúcar .....	92
3.5.3 Modelo matemático que describe el movimiento del martillo durante el proceso del impacto .....	93
<b>4. Capítulo 4: Proceso de optimización del martillo .....</b>	<b>102</b>
4.1. Introducción .....	102
4.2. Proceso de optimización .....	102
4.3. Validación experimental de la funcionalidad del martillo .....	109
4.2. Comparación de martillos .....	122

<b>5. Conclusiones, trabajos futuros y aportes a la investigación</b> .....	<b>128</b>
5.1. Conclusiones.....	128
5.2. Trabajos futuros .....	128
5.3. Aportes a la investigación.....	129
<b>6. Bibliografía</b> .....	<b>131</b>

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Molino de discos ranurados [25].....	13
Figura 2. Trituradora giratoria. [28] .....	14
Figura 3. Trituradora de mandíbulas [29].....	16
Figura 4. Trituradora de rodillos dentado.[26] .....	17
Figura 5. Trituradora de rodillos no dentado [26] .....	18
Figura 6. Molinos de rodillos horizontal [14] y vertical [31].....	19
Figura 7. Molino de Martillos [13].....	21
Figura 8. Molino de tornillo sin fin [38] .....	24
Figura 9. Molino de bolas [34] .....	26
Figura 10. Montaje completo para la molienda de chocolate y recubrimiento de confitería [40].....	27
Figura 11 Órgano de corte de eje vertical para rastrojo [41] .....	28
Figura 12. Vista general de la picadora o molino forrajero de tambor [43] .....	29
Figura 13. Sistema de triturado que consta del tambor, discos laterales atornillados a éste y las cuchillas. [43] .....	30
Figura 14. Representación del corte de las cuchillas. ....	30
Figura 15 Molinos de agujas.....	32
Figura 16. Los tipos de platos. [24].....	38
Figura 17. Gráfica comparativa entre el molino de platos con el molino de martillos en la molienda de tres tipos de granos diferentes. [24] .....	39
Figura 18. Efecto del contenido de humedad en la capacidad de los dos molinos.[24]...	40
Figura 19. Estudios previos de aumento de eficiencia de corte en molinos de martillos [52].....	43
Figura 20. Estructura interna del molino de martillos hecho en Solidworks.....	60
Figura 21. Vista interna de un martillo dentro del sistema. ....	60
Figura 22. Plano del disco .....	61
Figura 23. Martillo con las dimensiones en milímetros.....	62
Figura 24. Foto donde se describe el montaje que se hizo en el cableado el cual se encarga de entregarle energía eléctrica al motor.....	69
Figura 25. Resultados obtenidos en el primer experimento .....	70
Figura 26. Resultados del segundo experimento teniendo en cuenta que las líneas rojas describen los momentos los cuales introdujeron las muestras al molino .....	72

Figura 27. Resultados del tercer experimento teniendo en cuenta que las líneas rojas describen los momentos los cuales introdujeron las muestras al molino .....	73
Figura 28. Resultados del cuarto experimento teniendo en cuenta que las líneas rojas describen los momentos los cuales introdujeron las muestras al molino .....	75
Figura 29. Resultados del quinto experimento teniendo en cuenta que las líneas rojas describen los momentos los cuales introdujeron las muestras al molino .....	76
Figura 30. Relación entre cargas totales contra polvos finos.....	77
Figura 31. Picos más altos vs masa o carga .....	78
Figura 32. Diagrama de cuerpo dinámico que describe el comportamiento que existe entre el tambor y el martillo .....	81
Figura 33 Diagrama de simulink para calcular las ecuaciones .....	85
Figura 34. Gráfica $q_2$ vs $t$ (equivalentemente $q_2$ vs $q_1$ ).....	85
Figura 35. $q_2$ vs tiempo ( $q_2$ equivalente vs $q_1$ ) .....	86
Figura 36. $q_2$ vs tiempo ( $q_2$ equivalente vs $q_1$ ).....	86
Figura 37. Posición longitudinal del bagazo después del impacto con respecto a la posición angular del tambor .....	101
Figura 38. Angulo del martillo después del impacto con respecto a la posición angular del tambor .....	101
Figura 39. Geometrías de martillos para molino que se encuentran en el momento en la industria .....	103
Figura 40. Geometría del martillo sin optimizar .....	104
Figura 41. Propuesta de geometría de martillo óptimo .....	105
Figura 42. Pantallazos del solver usado en el programa Excel .....	108
Figura 43. Planos del martillo optimizado.....	109
Figura 44. Resultados del primer experimento usando martillos óptimos .....	111
Figura 45. Resultados del segundo experimento .....	112
Figura 46. Resultados del tercer experimento .....	113
Figura 47. Resultados del cuarto experimento .....	115
Figura 48. Resultados del quinto experimento .....	116
Figura 49. Resultados del sexto experimento .....	118
Figura 50. Resultados del séptimo experimento.....	119
Figura 51. Pesos en gramos por muestra de cada experimento vs consumo de potencia más alto por experimento.....	120
Figura 52. Comparación entre polvos finos y pesos totales de muestras usadas en cada experimento .....	121
Figura 53. Comparación de obtención de polvos finos usando ambos martillos.....	124

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Modelos de trituradoras de mandíbulas. [30] .....	16
Tabla 2. Características de los molinos de bolas [40] .....	26
Tabla 3. Tabla comparativa de los diversos molinos.....	33
Tabla 4. Comparativo entre el molino de discos y el molino de martillos. ....	36
Tabla 5. Caracterización de la pinza volti - amperímetro .....	64
Tabla 6. Caracterización de la gramera de cocina.....	65
Tabla 7. Caracterización del tacómetro .....	66
Tabla 8. Caracterización del molino de martillos usado en el experimento .....	66
Tabla 9. Caracterización del bagazo de caña [57] .....	67
Tabla 10. Descripción de los experimentos para caracterizar la potencia con respecto a las cargas.....	67
Tabla 11. Peso de los polvos finos después de la molienda.....	77
Tabla 12. Valores conocidos para la solución de ecuaciones .....	84
Tabla 13. Valor de las variables desconocidas.....	87
Tabla 14. Datos obtenidos con la esfera de hierro.....	89
Tabla 15. Datos obtenidos con la esfera de acero.....	90
Tabla 16. Valores para cada experimento de impacto .....	93
Tabla 17. Valores conocidos y desconocidos del modelo matemático.....	96
Tabla 18. Resultado numérico de los valores desconocidos para validación del modelo	97
Tabla 19. Dimensiones de la geometría del martillo sin optimizar usados en los experimentos.....	104
Tabla 20. Forma canónica de la optimización.....	106
Tabla 21. Dimensiones del martillo optimizado.....	107
Tabla 22. Resultado de los martillos aplicando el modelo matemático .....	108
Tabla 23. Procedimiento del experimento.....	110
Tabla 24. Resultados de pesar las cargas de polvos finos en cada experimento .....	121
Tabla 25. Tabla comparativa de picos más altos con respecto a las cargas molidas.....	122
Tabla 26. Tabla comparativa de eficiencias de corte .....	124
Tabla 27. Valores de potencia promedio tomado de los experimentos anteriores. ....	125
Tabla 28. Consumos de energía durante el proceso de triturado .....	126
Tabla 29. Aportes que hizo la tesis a la investigación.....	129

## Introducción

En la agroindustria colombiana, el sector panelero ocupa el segundo lugar y a nivel mundial es el segundo productor de panela, después de la India, pero a pesar de ello, sólo el 2% de la industria de todo el país posee alta tecnificación y el 15% medianamente tecnificada, en su mayoría es un proceso artesanal altamente ineficiente, además de generar contaminación en ríos y bosques, por este motivo, una propuesta para reducir estos problemas es pelletizar el bagazo, ya que así tiene mayor poder calorífico sirviendo como combustible limpio, sin recurrir a la deforestación, reduciendo el almacenamiento del bagazo como desecho, evitando que también vayan a lugares como ríos y bosques.

Para el proceso de pelletización se requiere de una máquina la cual tenga como función triturar hasta obtener polvo fino, el cual luego se le adiciona aglutinantes, para luego introducir la mezcla en la máquina extrusora, y así producir los pellets. El problema aquí es que la mejor máquina que puede triturar a ese nivel el bagazo de caña, debido a su forma fibrosa, es el molino de martillos, la cual se caracteriza por ser ineficiente durante su funcionamiento, el motivo es porque consume una alta cantidad de potencia eléctrica en relación a la cantidad de polvos finos obtenido del proceso, adicionando que no muele la totalidad de la materia que se le introduce, quedándose en la máquina sin poder pasar por la criba, ocurriendo un factor de estancamiento que puede perjudicar la máquina durante el proceso de operación; Debido a lo anterior se propone optimizar la geometría de los martillos del molino, ya que al hacerlo, en comparación con los martillos tradicionales durante el mismo periodo de tiempo, se reduciría el consumo de potencia de la máquina y la cantidad de material estancado, aumentando así la producción de polvos en el triturado.

El proceso de optimización se hace con el fin de cambiar la geometría de la pieza, del martillo en este caso, para mejorar ciertas características de la máquina en general, en este caso, con este proceso se redujo el consumo de potencia eléctrica en un 51% operando bajo las mismas condiciones cinemáticas, cinéticas y de carga de bagazo de caña que se hacía usando los martillos convencionales, aumentando además cantidad de polvo fino a través de la molienda en un 55% bajo las mismas condiciones de experimento.



# 1. Capítulo 1: Planteamiento del problema

## 1.1 Introducción

La pelletización fue un proceso aplicado en elaboración de alimentos para animales, Nanjing Pellet Mill Co [1] y Wang [2] comentan que en 1970 en China algunas empresas empezaron a aplicar este proceso para hacer pellets de madera para ser utilizados como combustibles. En el siglo XX no fue tan apetecido este producto, debido al uso de otros combustibles menos costosos de origen fósil. Todo lo anterior fue cambiando debido a que el precio del petróleo empezó incrementar con el tiempo hasta llegar a muy altos costos, que incluso en la actualidad persiste, como lo explica El Departamento de Energía de los Estados Unidos: Administración de la información de la energía [3] en las Figuras 1. Además surgen reglamentaciones ambientales, la cual fue tomada por Ballester [4], el cual explica los contaminantes que se puede obtener a través de los derivados del petróleo, esto permite retornar la mirada a combustibles ecológicos como la biomasa, la cual es rentable para generar energía de combustión con bajo nivel de contaminación, como lo afirma la empresa Ayico Group [5].

Las biomásas surgen de los residuos de plantas, las cuales son implementados como alimento o como combustible, esto se debe a la optimización de recursos al emplear materiales que son considerados desechos. Para el caso del bagazo de caña de azúcar, su almacenamiento genera dificultades porque propicia la aparición de insectos y roedores, además si este llega a ríos y bosques, generan contaminación, debido a que durante el proceso de descomposición emite malos olores y produce bacterias que puede perjudicar la salud humana, tal como lo afirma Almazán [6] ; es por eso que se vio la necesidad de darle un uso apropiado en la industria. Agüero et al [7] afirma que el uso directo del bagazo como combustible es ineficiente, debido a que sale del proceso con índices de humedad cercanos al 52% y adicionándole la estructura biológica del bagazo que ocurra que haya efectos de resistencia de calor; cuantitativamente hablando se habla de valores de un

poder calorífico de 1570,20 Kcal/kg en su estado natural, después del proceso de pelletización, Tiwari [8] habla de valores de 4588,8 Kcal/Kg. García [9] afirma que el campesinado colombiano en su afán de reducir costos de producción emplea elementos contaminantes como combustible, por tal motivo, hay una concentración de CO de 48,13 kg CO/8.105,3 kg gas 5938 ppm; y una concentración de CO<sub>2</sub> de 213 kg CO<sub>2</sub>/ h/8.105,3 kg gas 2,63%. Pirraglia [10] y Carroll et al [11] adicionalmente afirman que los pellets de biomasa son combustibles muy eficientes y baratos.

El proceso de pelletización consta de los siguientes pasos según Jannasch [12]:

1. Trituración o molienda del material, es un proceso que depende del tipo de máquina y del material se puede hacer en uno o más máquinas, hasta que el material tenga el tamaño de partícula deseada.
2. Extrusión, es un proceso que siempre se hace en una sola máquina, consiste en comprimir el material hasta obtener una forma deseada, el cual se denomina pellet, antes de iniciar el proceso es recomendable adicionarle al material triturado un producto químico denominado como aglutinante, el cual tiene como propósito fortalecer la unión de las partículas durante el proceso de compresión.
3. Cabe decir que en algunos casos al material se somete a tratamiento térmico, ya sea antes del periodo de extrusión y/o cuando se es pellet para garantizar propiedades, ya sean proteínicas si va ser usado como alimento o para aumentar su poder calorífico si va ser usado como combustible de biomasa.

## 1.2 Problema de Investigación

El material el cual se triturará para luego ser pelletizarlo es el bagazo de caña, pero debido a diversos, entre esos su forma fibrosa, el equipo que mejor lo puede molerlo hasta dejarlo en polvo fino es el molino de martillos; pero se ha identificado un gran problema en este equipo, el alto consumo de potencial eléctrico, obteniendo consecuencias como los descritos por Koch [13], Bradshaw [14] y Trujillo Calderón et al [15] como generación de ruido, polución, y baja eficiencia de molido, ya que según Bitra [16], su máximo valor alcanzado ha sido de 28,96%.

En el afán de encontrar como reducir este problema de alto consumo de potencia en los molinos de martillos, se han hecho diversas investigaciones, como el caso de Jannasch

[12] que descubrió que al aumentar el flujo de alimentación, se puede alcanzar una eficiencia de corte de 66.71%; también están Naimi et al [17] quienes dedujeron que entre mayor es el área de apertura de la criba, menor es el consumo eléctrico; pero quien llamó más la atención fue Yancey [18], que encontró la manera de aumentar la eficiencia de corte hasta cuatro veces en comparación de un molino convencional, aumentando la longitud de los martillos. Debido al último resultado descrito, se concluyó que si se cambia la geometría del martillo se podría obtener valores de eficiencias de corte altos, obteniendo en consecuencia, menor consumo de potencial eléctrico.

### 1.3 Justificación

El motivo por lo cual se determinó que el molino será implementado para la molienda del bagazo de la caña panelera es debido a que en Colombia la segunda agroindustria más productiva es la panela, siendo el primero el café, tal como es descrito por Leiva [19], además Colombia es el segundo productor en el mundo después de la India, razón por la cual la panela es un producto muy importante para el país.

A pesar de la producción, Arias et al [19] afirma que sólo el 2% poseen alta tecnificación, es decir, 460 de los 23000 trapiches en todo Colombia son altamente tecnificados, razón por la cual tienen la capacidad de producir panela de 250 Kg/hora, en donde según Mójica [20] se ubica en los departamentos de Valle del Cauca y Risaralada y Leiva [19] incluye el sector de La Hoya del Río Suárez ; En cuanto a la productores medianos, es decir, los que producen entre menos de 150 hasta 250 Kg/hora según Leiva [19] abarcan 3450 trapiches del país, además Mójica [20] afirma que estos se ubican en los departamentos de Antioquia, Santander y Boyacá (en el sector de La Hoya del Río Suárez) y se caracterizan por poseer algo de tecnificación la cual justifica su producción; El resto del país, según Leiva [19] posee una producción menor de 100 Kg/hora, considerados como productores menores debido a que poseen poca tecnificación, los cuales lo abarca el 83% de los productores de panela del país, es decir alrededor de 19090 trapiches en el país.

Debido a que la mayoría de los productores de caña son productoras menores, los campesinos cañicultores ganan apenas lo que le da para subsistir, Castellanos et al [21] afirma que la mano de obra de un cañicultor tiene un costo de \$480/Kg hasta \$297/Kg, además según Mójica en [20] se estima que hay 350000 de empleos directos y más de un millón de empleos indirectos en Colombia, y en el año lo máximo que ha llegado a

producir es de 13.176 Toneladas de panela en Colombia, según Castellanos et al [21] el costo de producción oscila entre \$840,10 hasta \$1523,65 por kg, y el precio de mercado de la panela por kilogramo es de \$1.523,64, en cuanto a ganancia, los productores en el Valle de Cauca gana aproximadamente el 28% de lo producido y Boyacá el 20%, tal como lo describe Castellanos et al [21]. La causa de ello es debido a que según Mojica en [20] debido a que el sector panelero está conformado por campesinos sin conocimientos en administración, razón por la cual es desordenado y no posee trabajo asociativo, la falta de disponibilidad de recursos, la falta de estrategias comerciales, además de que la deficiencia en tecnificación la cual hace que los productores medianos y pequeños no puedan igualar a los grandes productores.

En cuanto a la baja tecnificación se ha llegado a un problema específico muy grave, el cual es el bajo poder calorífico de los hornos paneleros, ya que para que en los trapiches considerados de baja producción usan como combustible leña, la cual genera deforestación en los bosques de Colombia, bagazo de caña de azúcar, y contaminantes como llantas y caucho tal como lo describe García en [9] para generar el calor deseado en los hornos paneleros. La emisión de los gases como está descrito textualmente por García en [9] es 48,13 Kg/hora de CO y 213 Kg/hora, además de que se menciona sin cuantificar emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>, razón por la cual García en [9] afirma que en las paneleras debido al uso de caucho y leña puede aumentar la emisión de estos compuestos, dando cifras consideradas como “por encima de los límites permisibles”.

El poder calorífico es mayor cuando el bagazo de caña se quema en forma de pellets. Agüero [22] afirma que el bagazo proporciona un poder calorífico de 7452 KJ/Kg, mientras que Tiwari [8] concluye que los pellets de caña de azúcar tienen un poder calorífico mínimo de 19200 KJ/Kg, lo cual muestra que el bagazo es mejor combustible en forma de pellet.

## 1.4 Hipótesis

La optimización de la geometría del martillo de un molino podría aumentar la eficiencia de molido de bagazo de caña panelera

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Optimizar el martillo de un molino para reducir el consumo de potencia en la molienda de bagazo de caña panelera.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar experimentalmente la potencia consumida en la molienda de bagazo de caña panelera en un molino.
- Proponer un modelo que permita optimizar la geometría del martillo teniendo en cuenta el consumo de potencia.
- Validar experimentalmente el modelo empleando la geometría óptima.

## **2. Capítulo 2: Estado de arte**

### **2.1 Introducción**

Los molinos son una herramienta empleada para la molienda de materiales para diversos fines, ya sea para pelletizar materiales para ser implementados como alimentos, combustibles, diseño de souvenirs, entre otros. Existe diversos tipos de molinos los cuales su uso depende de factores como el tipo de tamaño de partícula que se desea obtener, el tipo de material a moler, costos económicos, cantidad de material a moler, entre otros factores. Por estas razones se busca seleccionar el molino más adecuado para la molienda del bagazo de la caña panelera, para este fin es necesario conocer los diversos molinos empleados en el área agroindustrial, sus ventajas, desventajas, y características principales, para luego finalmente concluir cual es el más adecuado para ésta aplicación.

## 2.2 Tipos de molinos

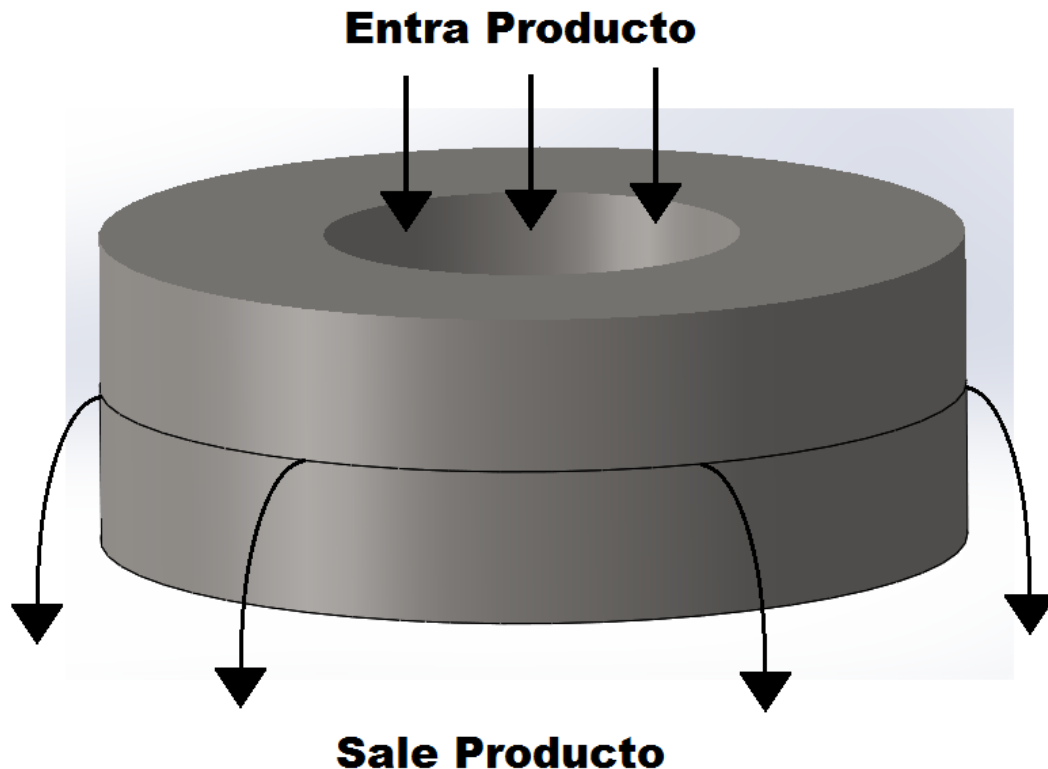
Los molinos son máquinas las cuáles se encarga de triturar la materia prima, en la agroindustria se implementa las siguientes:

### 2.2.1 Molino de platos

De Guzman Ospina [23], Henderson y Perry [24] describen el molino compuesto por dos platos rugosos, que pueden estar en posición horizontal o vertical, uno de ellos es estacionario y otro que se encarga de rotar, sus diámetros oscilan entre 102 mm y 1524 mm; el material es colocado entre los platos, los cuales se encargan de tritararlo; entre más rápido sea el caudal de alimentación de la materia y más pequeño sea los agujeros de la malla, mejor es el triturado. En la figura 1 se puede apreciar un esquema el cual explica el comportamiento de un tipo de diseño de la misma, en el cual, durante el proceso de operación, el material es introducido en el agujero que se encuentra en el medio de uno de los platos, que por efectos de inercia o fuerza centrífuga, este va hacia la región estriada de los discos, en el cual ocurre el triturado, hasta tener el tamaño de partícula suficiente para salir por los extremos de los platos. Cabe decir que es muy difícil hacer molienda fina con este tipo de molino. El material de los discos son fundición dura o acero aleado, dependiendo de lo que se vaya a triturar. Las velocidades de operación son usualmente menores de 1200 rpm. Las estrías de los platos varían conforme sea el material a moler y la velocidad de molienda, en el área donde mayormente se aplica es para la trituración de granos pequeños, fibras celulósicas (fibras la cuales son creadas de celulosa, por ejemplo, el algodón) y maíz oreja.

Entre las ventajas de este tipo molino están: sus costos de adquisición, los cuales son bajos, el material triturado puede llegar a ser muy uniforme, y requiere baja potencia, razón por la cual Henderson y Perry [24] consideran económico en el momento de operación.

Henderson y Perry [24] afirma las siguientes desventajas de la máquina: sensibilidad a que haya ruptura de las piezas debido a un material foráneo; la operación en vacío puede causar desgaste de los discos y además, los discos desgastados pueden producir resultados pobres.

**Figura 1. Molino de discos ranurados [25]**

En relación a los requerimientos de potencia, Henderson y Perry [24] concluye que es un valor que requiere de varios componentes, entre ellos, el tipo de material a moler, contenido de humedad, caudal de alimentación, tamaño de grano del material a moler, etc.

### **2.2.2 Trituradoras giratorias.**

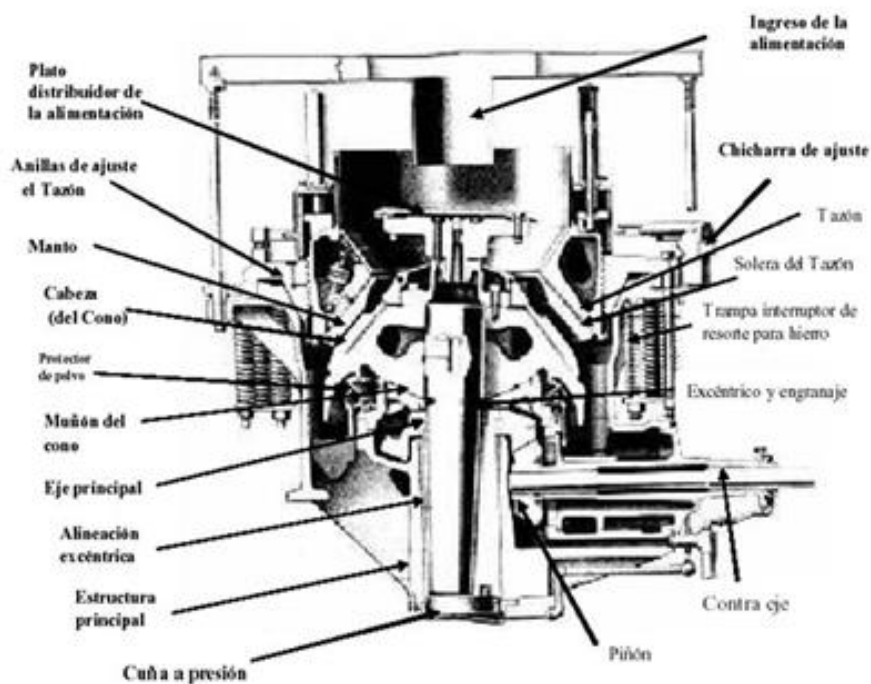
Henderson y Perry [24] explica que la trituradora giratoria consiste en un eje el cual es girado por un motor, éste se encarga de hacer girar el cono triturador, cuando se le introduce el material a moler, éste va triturándolo debido a efectos a presión, debido a que la parte superior del cono está sin apretar para que el material a moler entre allí, en la figura 2. se puede apreciar la máquina con sus partes descritas.

McCabe [26] afirma que esta máquina es usada como un mecanismo de premolienda o post molienda, es decir, para garantizar molienda fina requiere de otro molino, ya que éste

solo no puede generar tamaños de partícula muy finos. Es usado para la molienda de materiales no fibrosos mínimo de 6 mm.

Cabe decir que en la actualidad esta máquina y la trituradora de mandíbulas son consideradas obsoletas en el área de alimentos, por ende, ya no se utilizan, tal como lo afirma Balcazar [27].

**Figura 2. Trituradora giratoria. [28]**



McCabe [26] plantea que para evaluar la potencia que consume la máquina se toma la ecuación (1) :

$$P = \frac{6\dot{m}e_s}{\eta_c \eta_m \rho_p} \left( \frac{1}{\phi_b D_{sb}} - \frac{1}{\phi_a D_{sa}} \right) \quad (1)$$

Donde:

$\dot{m}$ : Velocidad de alimentación.

$e_s$ : Error de incertidumbre (entre 0,06 a 1).

$\eta_m$ : La relación entre la energía absorbida y la entrada de energía (la eficacia mecánica).

$\eta_c$ : La relación entre la energía superficial creada por la desintegración mecánica y la energía absorbida por el sólido (eficacia de desintegración)

$\rho_p$ : Densidad de la partícula.

$\bar{D}_{sa}, \bar{D}_{sb}$  = Diámetro/medio volumen-superficie de la alimentación y el producto, respectivamente

$\phi_a, \phi_b$  = Esfericidad de la alimentación y el producto, respectivamente

### 2.2.3 Trituradora de mandíbulas

Aunque el funcionamiento es diferente, según Henderson y Perry [24] posee las mismas ventajas, desventajas y usos que la trituradora giratoria, incluso el mismo tamaño de grano, con la diferencia que la máquina anterior es más compacta en tamaño que la trituradora de mandíbulas, aunque ésta es más barata pero más lenta que la giratoria y es usada para pequeña producción, ya que la trituradora giratoria es más suave y su capacidad es más alta. Este consta de un conducto, el posee una pared móvil unida a un pistón y una pared estática, cuando el material es introducido por este sector, el pistón se mueve, tratando de unir la pared que está unido a ésta con la estática, haciendo que ocurra un efecto de presión que se encarga de la molienda, tal como se aprecia en la figura 3.

**Figura 3. Trituradora de mandíbulas [29]**



La tabla 1, la cual la empresa L. Shanghai Zenith Mining and Construction Machinery Co describe cuales son las potencias de la máquina según sus especificaciones, cabe decir que, aunque las máquinas descritas son para uso mineral, según la empresa también pueden ser aplicadas para la trituración de semillas:

**Tabla 1. Modelos de trituradoras de mandíbulas. [30]**

Modelo	Dimensión de boca para entrada (mm)	Tamaño de alimentador máxima (mm)	Capacidad (t/h)	Potencia de motor (KW)	Peso(t)
PE500×750	500×750	425	40-110	45-55	12
PE600×900	900×600	480	90-180	55-75	17
PE750×1060	1060×750	630	110-320	90-110	29
PE900×1200	900×1200	750	220-450	110-132	52
PE1000×1200	1000×1200	850	315-550	110-132	57
PE1200×1500	1200×1500	950	400-850	220	82.5

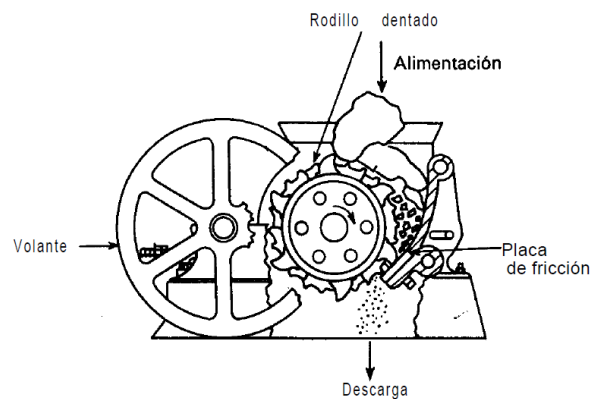
Cabe decir que la ecuación (1) se puede aplicar para conocer los requerimientos de potencia de esta máquina.

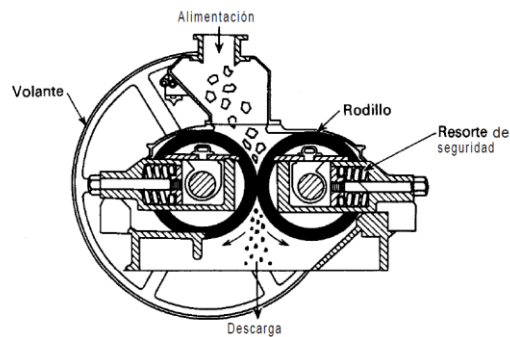
### 2.2.4 Trituradora de rodillos

Henderson y Perry [24] dice que al igual que las trituradoras anteriores, es usada como un mecanismo de pre - molienda o post - molienda, ya que no puede garantizar tamaño de partícula fina por sí sola, de hecho es muy usado en serie con el molino de platos.

Según Henderson y Perry [24], estas trituradoras son muy usadas para la preparación de cereales para consumo humano y para granos pequeños, tiene dos presentaciones, de rodillos dentados Figura 4 y de rodillos no dentados, tal como se ve en la Figura 5. Su costo de esta máquina es costoso que el molino de platos, pero más barato que molino de martillos. La trituradora consta de uno o dos rodillos, estos se encargan de triturar el material que se le introduce en medio de estos mientras está en funcionamiento, o en el caso de un rodillo, en la región intermedia entre el rodillo operando y una pared curva. Para el caso de los rodillos dentados, los dientes cumplen la función de afianzar la molienda del producto.

**Figura 4. Trituradora de rodillos dentado.[26]**



**Figura 5. Trituradora de rodillos no dentado [26]**

Para la obtención del consumo de potencia se puede aplicar para este caso la misma ecuación (1) que plantea McCabe et al [26].

### 2.2.5 Molinos de rodillos

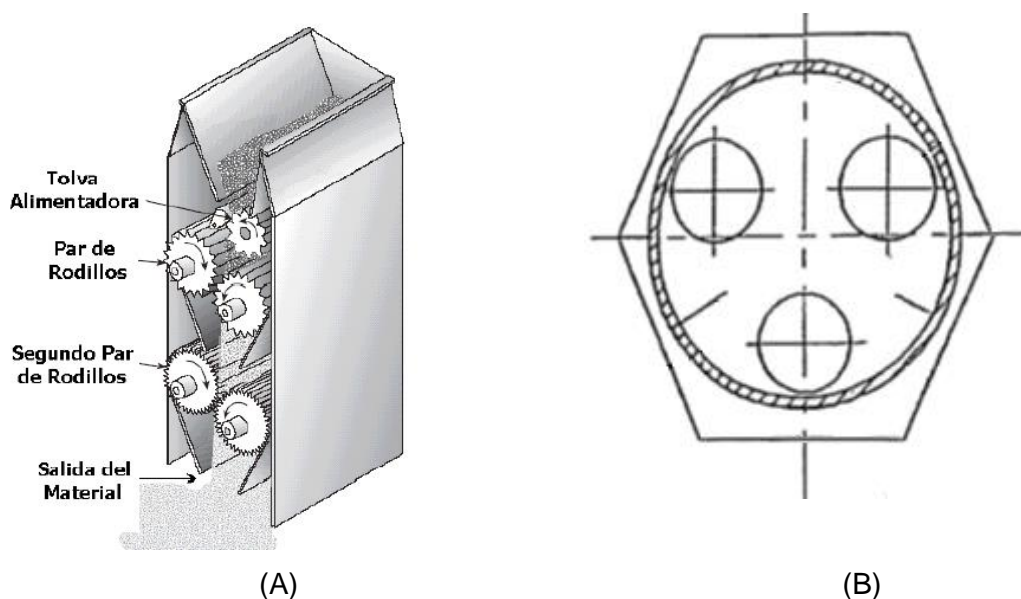
Bradshaw [14], De Guzman Ospina [23], Hao [31], Hendeson [24] y la empresa Kim Koch [13] coinciden en describirlo como el molino que tiene más demanda para la molienda de granos, la razón es porque es el segundo molino que produce el tamaño de partícula más pequeño en la industria actualmente, precedido por del molino de martillos. En aspecto adquisitivo es más costoso que el molino anterior, pero a la vez, es más económico en el aspecto de producción y mantenimiento, uno de los motivos es porque consume menos potencia eléctrica. Los molinos de rodillos verticales constan de un sistema de rodillos dentados, los cuales giran en posición contraria una con respecto a la siguiente, el material cuando es introducido a la máquina, los rodillos muelen el material durante la caída, por efectos de la gravedad, tal como se aprecia en la figura 6 A. También existen molinos de rodillos horizontales, los cuales consiste en un dado en forma de anillo, y sus bordes están engranados con dos o más rodillos dentado, cuándo el anillo o alguno de los rodillos giran (dependiendo de dónde esté transmitiendo la energía del motor a la máquina), hace que todo el sistema gire; y por efecto de inercia o energía centrífuga, el material se desplace a los extremos (debido a que la base está unida al anillo), haciendo que los rodillos y el anillo trituren el material, hasta alcanzar el tamaño de grano suficiente para pasar por los agujeros ubicados en los bordes del mismo dado, tal como se observa en la figura 6 B.

Bradshaw [14] afirma que los molinos de rodillos no usan criba para controlar los tamaños de granos, a diferencia del molino de martillos, ya que el material molido se debe “diluir” a

través de la criba, algo por lo cual puede generar fallas mecánicas, debido a las obstrucciones que impida que el flujo de material sea constante. Además, cabe resaltar que el molino de rodillos tiene gran capacidad de producción y el producto final sale limpio.

Otra característica que Bradshaw [14] describe, que a diferencia del molino de martillos, puede humectarse con agua y/o adicionarle otros tipo de aglutinantes al material a moler durante el proceso de molienda, con el fin de hacer más eficiente el proceso de producción de pellets, ya que el mismo molino puede pelletizar el producto después de la molienda. Con los molinos de rodillos modernos necesitan menos lubricación que las otras, pero cuando se desgasta los dientes de los rodillos, lo único que se debe hacer es remplazar los rodillos por otros, ésta es una de las razones por la cual se afirma que el mantenimiento correctivo es algo costoso en este tipo de máquina.

**Figura 6. Molinos de rodillos horizontal [14] y vertical [31]**



González et al [32] propone que para el requerimiento de potencia de la máquina para uso agropecuario se use el siguiente modelo:

$$Y = b_0 + b_1H + b_2W + b_3M + b_4F + b_5R + b_6D + b_7G + e \quad (2)$$

Donde:

Y = variable respuesta – potencia del rodillo rápido (kW/m), o potencia del rodillo lento (kW/m), o potencia neta (kW/m), o energía por unidad de masa (kJ/kg), o energía específica (kJ/m<sup>2</sup>).

b<sub>0</sub> = intercepto.

b<sub>i</sub> = coeficiente para la covarianza correspondiente o variable independiente, i = 1, 2, ... 7.

H = dureza de una semilla (adimensional).

W = peso de una semilla (mg).

M = contenido de humedad (% base húmeda).

F = cantidad de alimentación (kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>).

R = velocidad del rodillo rápido (rpm).

D = velocidad diferencial del rodillo (m/s).

G = Espacio en el rodillo (mm).

e = error debido al azar.

La página Wordpress [33] describe que en el aspecto económico, el molino de rodillos con mayor capacidad de producción, oscila entre 700 y 950 Kg de pellets/hora y tiene un costo de US\$ 84.443,25.

## 2.2.6 Molinos de martillos

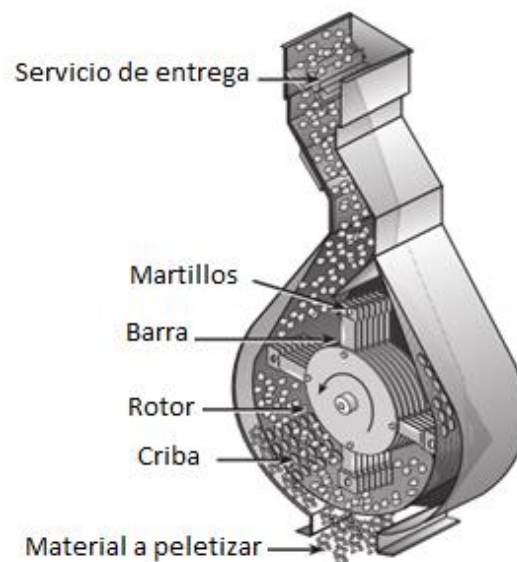
Kim Koch [13] lo describe como uno de los molinos más económicos en el mercado, uno de los motivos a que se debe esto es por sus bajos costos relacionados con el mantenimiento; Su modo de operar es bastante simple ofrece una amplia gama de tamaños de partícula, adicionando que es eficiente triturando material fácil de desmenuzar y fibras, aunque puede moler cualquier material. En la figura 7 puede apreciar la máquina. Su funcionamiento consiste en una serie de piezas denominadas martillos las cuales están unidas en un sistema de ejes que están en medio y casi de los bordes de un sistema de placas circulares denominadas como tambores; estas placas son atravesadas en el medio por un eje principal el cual se encarga de transmitir el movimiento de rotación que produce

motor; Tal movimiento rotativo hace que por efectos de inercia los tambores giren junto con los martillos, ocasionándole varios golpes al material, varias en varios fragmentos, los cuales rebotan por la parte interna de la carcasa, retomando de nuevo a la posición de los martillos, donde son golpeados de nuevo, haciendo que se rompa más el material, repitiendo el proceso una y otra vez, hasta llegar a tal punto que los fragmentos de la muestra puedan atravesar la criba que se ubica en la parte inferior de la máquina.

Bradshaw [14], Kim Koch [13], Trujillo y Calderón [34] coinciden en hacer la comparación entre el molino de martillos y el rodillos, dando como resultado que el de martillos es desventajoso en consumo de energía eléctrica, es ruidosa, produce mucho calor, polución y produce tamaños de partículas no homogéneas.

Bradshaw [14] afirma que el diseño del molino de martillos es sencillo, pero cuando uno de los martillos se daña, se detiene la producción, es decir, hay que esperar que la pieza esté reparada para que la máquina funcione de nuevo.

**Figura 7. Molino de Martillos [13]**



Otro aspecto ahora a tener en cuenta es el económico, lo cual describe con detalle todos los gastos relacionados con el tema de los molinos de martillos a continuación:

Mani et al [35] analiza el costo de mantenimiento del molino de martillo es aproximadamente el 10% del costo de adquisición, el cual es de aproximadamente US\$

60000, un costo de instalación de US\$ 24000, con una vida útil aproximadamente de 10 años, su factor de recuperación del capital de 0.1359, un costo de capital anual de US\$ 11000, y un costo de capital específico de 0.25 US\$/t, costo de operación es de 0.70 US\$/t, un costo total de 0.95 US\$/t, y un porcentaje de distribución de costo 1.88%. Estos datos fueron tomados en el 2004 para una planta de producción de pellets para combustible con material de biomasa como materia prima. Hay que tener en cuenta que la máquina pelletizadora tiene una velocidad de producción de 6 toneladas de pellets/ hora, con una producción anual de 45000 toneladas, la cual trabaja durante 24 horas, 310 días al año.

Cortazar Figueroa [36] plantea que el modelo matemático para la energía requerida de molienda es el siguiente:

$$E = \frac{P_C - P_o}{T} \left[ \frac{W.h}{kg} \right] \quad (3)$$

Donde:

$E$ : Energía necesaria para la molienda.

$P_C$ : Potencia consumida por el molino durante la molienda.

$P_o$ : Potencia consumida sin carga.

$T$ : Velocidad de alimentación durante la molienda.

Ahora bien, para obtenerse los valores de  $P_C$  y  $P_o$  se hace lo siguiente para ambos casos:

$$P = V * I * \cos\varphi \quad (4)$$

Donde:

$V$ : Voltaje de la corriente eléctrica respectivo para ambas situaciones (sin y con molienda de material)

$I$ : Es la corriente eléctrica que se utilizó para los dos casos (con y sin molienda de material)

$\varphi$ : Es el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente o amperaje.

### 2.2.7 Molino de tornillo sin fin

Alvan Banch [37] describe que su principal aplicación es para la molienda de comida para peces (contiene granos y carne) y para la molienda de soya; se caracteriza porque durante la trituración, debido a la fricción, el material molino además de mezclarse, se cizalla y se cocina debido al efecto del calor que ocurre durante la acción mecánica, debido a que la temperatura aumenta en un rango de 120°C-175°C en 30 segundos. Existen dos tipos de molinos, los que contienen un tornillo sin fin y los que consta de dos unidos en serie, la diferencia de ambos es el tamaño de partícula, ya que dos tornillos unidos pueden producir un tamaño de grano más pequeño, aunque para el mismo efecto también se recomienda unir dos molinos en serie para que el material que sale de uno pueda ser otra triturado de nuevo por el otro. La máquina se puede apreciar en la figura 8.

Kutz [38] describe el funcionamiento de la máquina, la cual consiste en comprimir los materiales desde el momento el cual está en contacto con el tornillo sin fin mientras está operando, este efecto hace que estos por efectos de la presión se trituren, se mezclen, y se desplacen además hasta llegar al orificio de salida, que por lo general se encuentra en el otro extremo de la máquina. Para mejorar los efectos descrito de molido en la misma, Kutz [38] recomienda cambios de geometría, denominados como bloqueos de corte de diámetro para forzar el producto a que entre por la sección adyacente del tornillo, aunque también puede tener el mismo efecto sí se selecciona entre un acanalado o un barril espiral de paredes, esto hace que el mezclado y cizallamiento sea mayor, debido al cañón estriado ya que hay mayor deslizamiento entre el tramo de tornillo y paredes de cañón.

M. Kutz [38] explica que las extrusoras de tornillo sin fin continuo todavía se construyen debido al efecto llamado “cocinado con baja presión y formación de procesos”. Pero, los tornillos sin fin segmentados y secciones de cilindro ofrecen una considerable versatilidad en la personalización del diseño y se puede sustituir piezas desgastadas, este tipo de diseño se utiliza en la mayoría de diseños de molinos de tornillo sin fin.

Figura 8. Molino de tornillo sin fin [38]



Singh et al [39] plantea el siguiente modelo matemática para determinar el consumo de energía de éste es a través de la siguiente ecuación:

$$p_t = p_s + V_d \Delta P \quad (5)$$

Donde:

$p_t$ : Es la energía consumida

$p_s$ : Es la porción energía consumida debido por efectos viscosos del material molido.

$V_d$ : Tasa de flujo de arastre.

$\Delta P$ : Es el valor absoluto de la caída de presión a través la longitud del canal.

$p_s$  está se puede hallar matemáticamente usando el término “Número de poder atornillado” ( $N_p$ ), el cual se define como:

$$N_p = \frac{p_s}{\rho \cdot N^3 \cdot D^4 \cdot L} \quad (6)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del material que se está moliendo.

$N$ : Velocidad de rotación del tornillo sin fin.

$D$ : Diámetro del tornillo.

$L$ : Longitud del tornillo.

$N_p$ : se halla relacionándolo con el número del tornillo de rotación de Reynolds ( $N_{Res}$ ), el cual se puede hallar como:

$$N_{Res} = \frac{[\rho(D.N)^{2-n}H^n]}{K\pi^{2+n}} = \frac{1}{N_p} \quad (7)$$

Donde:

$H$ : Altura del canal donde está el tornillo.

$K$ : Coeficiente de consistencia.

$n$ : Índice de comportamiento del fluido del material que se está moliendo.

Para hallar el  $V_d$  se usa la siguiente ecuación:

$$V_d = \frac{(\pi.N.D.W.H)}{2} \quad (8)$$

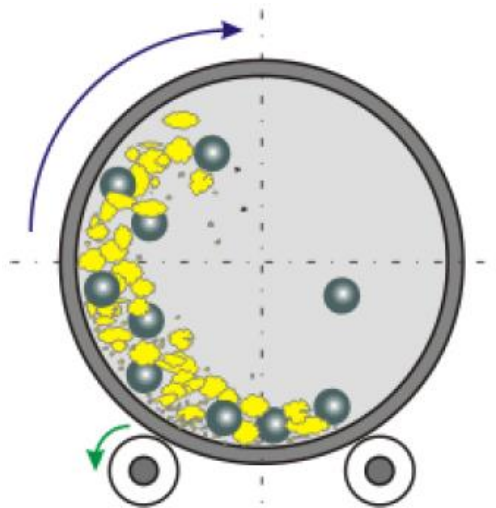
Donde:

$W$ : Ancho del canal donde se encuentra el tornillo.

### 2.2.8 El molino de bolas

Attritors [31] lo emplea industrialmente para el proceso del chocolate y recubrimiento de confitería, el uso consiste en un cilindro el cual contiene esferas en su interior y el material a moler, éste gira haciendo que las bolas triture el material hasta que el tamaño de las partículas sea menor a la de las esferas trituradoras. Trujillo y Calderon [34] afirma que el molino puede triturar materia prima húmeda y materiales explosivos; pero presenta diversos problemas, como el elevado consumo de energía, lo demorado que es llegar al producto final y su laborioso proceso de limpieza. Un esquema en donde se muestra sus partes es presentado en la figura 9.

**Figura 9. Molino de bolas [34]**



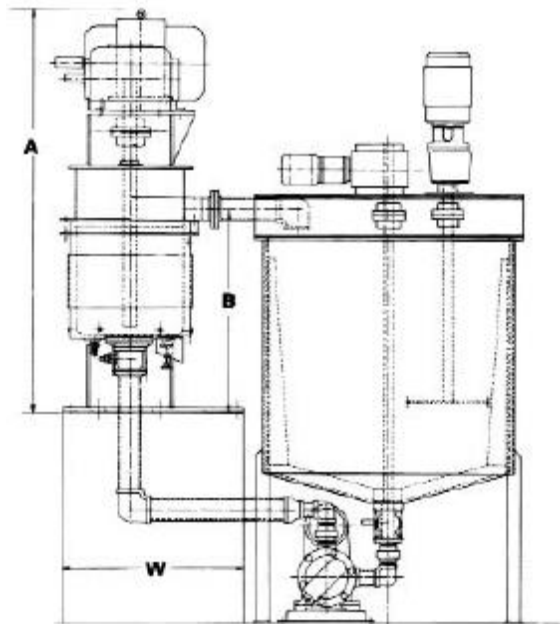
La siguiente es información acerca de las características del molino según capacidad y tamaño, figura 10 es una guía para entender la tabla 2:

**Tabla 2. Características de los molinos de bolas [40]**

Modelo (Attritors)	Q-2	Q-6	Q-15	Q-25	Q-50	Q-100
Capacidad del tanque de molienda (gal)	2.6	8.2	17	27.5	56	111
Volumen promedio (gal)	2.2	7.5	15	25	50	100
Capacidad recomendada del tanque donde se deposita el material molido (gal)	5 o 10	75	150	250	500	1000
HP	3-5	7.5-15	15-25	25-40	50-75	100-150
Tasa de bombeo (gal/min)	3.5	11	22	35	70	130
Altura total(A)	54"	74"	86"	96"	120"	124"

Distancia desde la base hasta el pico de descarga (B)	-	32"	37"	43"	53"	59"
Espacio del suelo (WxD)	26"x 50"	33"x 46"	37"x 53"	41" x 60"	50" x 70"	63" x 78"
Peso (lbs)	800	1800	3000	4000	6500	9900

**Figura 10. Montaje completo para la molienda de chocolate y recubrimiento de confitería [40]**



### 2.2.9 Órgano de corte de eje vertical para rastrojo

Esta trituradora, como su nombre lo indica, su principal aplicación es la trituración de rastrojo, consta de dos ejes los cuales tiene anexados una serie de cuchillas estáticas las cuales trituraran cuando los ejes giran, tal como se puede ver en la figura 13.

**Figura 11 Órgano de corte de eje vertical para rastrojo [41]**

Para la caracterización de su potencia consumida, Pérez de Corcho et al [41] propone calcularlo aplicando la ecuación (9), el cual está en función de la velocidad angular del rotor del órgano de corte.

$$N_T = \frac{(a.\omega^4)+(c.\omega^2)+((b+d).\omega)}{\eta_T} \quad (9)$$

Donde:

$N_T$ : Potencia total del sistema

$\omega$ : Velocidad angular del rotor del órgano de corte

$a$ : Pérdida de potencia por resistencia del aire

$b$ : Pérdida de potencia por lanzamiento del material a triturar

$c$ : Pérdida de potencia por fricción en los apoyos

$d$ : Pérdida de potencia por fricción en el corte

$\eta_T$ : Eficiencia de la transmisión del árbol de toma de potencia del tractor al órgano de corte de la trituradora

### 2.2.10 Molinos Forrajeros De Tambor

Tal como los describe Martínez Rodríguez et al [42] y Valdés Hernández et al [43] es una máquina utilizada para el para el picado y corte de forraje y corte de gramíneas tales como la caña de azúcar y el King-Grass para la preparación de conglomerados para la alimentación de animales, aunque según Martínez Rodríguez et al [42], son máquinas que producen altos consumos de potencia, y que además para una mejor trituración de material como el forraje se requiere de otros molinos para desmenuzar el material, tal máquina se puede observar a través de las figuras 12, en la figura 13 se puede observar el sistema de discos el cual se encarga de picar el material. Hay que tener en cuenta que este tipo máquina se caracteriza porque no deja el material molido en forma de polvos finos.

**Figura 12. Vista general de la picadora o molino forrajero de tambor [43]**





Donde:

$N$ : Potencia total consumida

$A$ : Pérdida de potencia por fricción

$B$ : Pérdida de potencia por batimiento del aire

$q$ : Caudal másico de material a picar

$A_e$ : Energía específica de corte

$F_c$ : Área de carga o área de corte que enfrenta la cuchilla en una revolución de motor.

$\gamma_c$ : Densidad de la masa procesada

$L$ : Longitud del material alimentado

$z$ : Número de cuchillas

$\omega$ : Velocidad angular del motor

$\alpha$ : Ángulo entre la dirección de la fuerza de corte y la perpendicular al plano de la sufridera.

$\varphi_{din}$ : Ángulo de fricción dinámico entre la masa alimentada y el material de la sufridera.

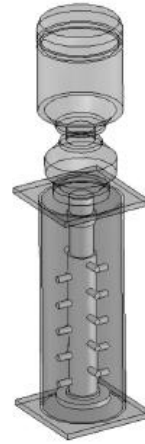
### 2.2.11 Molino de agujas

Según Food Engineering [44], su funcionamiento consta de dos platos los cuales contienen cilindros en su borde, cuando el material es introducido en el interior de la máquina a través de un vertedero, entra en contacto con los cilindros, ocurriendo así la molienda, teniendo en cuenta que solo uno de los discos gira mientras el otro permanece estático; este diseño se observa en la figura 15 A. Para el caso de los molinos de agujas verticales, el cual se aprecia en la figura 15 B, según Sinnott et al [45], consta de un eje en posición vertical con varios cilindros distribuidos en su alrededor, cuando este gira, el material a moler cuando es introducido, por efecto de la gravedad va cayendo mientras es golpeado a la vez por los cilindros en posición horizontal que están girando, generando así la ruptura de material, hasta llegar a la superficie inferior, finalizando así la molienda, obteniendo de esta manera el tamaño de partícula final.

Figura 15 Molinos de agujas



(A) [44]



(B) [45]

Aunque Sinnott et al [45] afirma que no se se conoce una ecuación para obtener la potencia neta de este tipo de molino, Meghwal y Goswami [46] aplica la ecuación (11) para obtener el consumo de potencia específica, aunque Breitung-faes y Kwade [47] aplican la misma ecuación (3) para calcular la energía que consume este molino. En cuanto su aplicación en la industria de los alimentos, según Food Engineering [44], esta máquina es aplicada para moler harina de arroz, almidones, azúcares, especias, polvos vitamínicos, granos y otros productos friables, aunque según Meghwal y Goswami [46], también se aplica para la molienda de granos, Shelake [48] propone un diseño de este tipo de molino para la molienda de la raíz de Cúrcuma, y Barnwal et al [49] aplica este tipo de molino para la molienda de semillas de cilantro.

$$S_p = \frac{P_c}{F_R} \quad (11)$$

Donde:

$S_p$ : Consumo de potencia específica  $\left(\frac{KWh}{Kg}\right)$

$P_c$ : La cantidad total de energía consumida en la molienda de una muestra (KW)

$F_R$ : Flujo de alimentación de las muestras  $\left(\frac{Kg}{h}\right)$

## 2.3 Discusión

El propósito del estudio de los diversos de los molinos es para encontrar el más adecuado para la molienda de bagazo de caña panelera. Según Vargas y Guerrero [50] describen el bagazo de caña de azúcar como una fibra, con una composición granulométrica y estructural heterogénea, con baja densidad y alto contenido de humedad, con un porcentaje de celulosa de 46,6%, 20,7% de lignina y 25,2% de hemicelulosa; además, Córdoba [51] agrega que al ser rico en lignina y celulosa lo hace más resistente para la molienda, por este motivo, se busca un molino que pueda pulverizar tal material. Así que primero se analiza los molinos estudiados, a través de la tabla 4, en donde se describe que materiales puede triturar cada molino y trituradora, para luego identificar los molinos o trituradoras que mejor pueden cumplir la aplicación deseada.

**Tabla 3. Tabla comparativa de los diversos molinos.**

<b>Molino</b>	<b>¿Qué materiales puede moler?</b>
Molino de platos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trituración de granos pequeños.</li> <li>• Fibras celulósicas (fibras la cuales son creadas de celulosa, como por ejemplo, el algodón).</li> <li>• Maíz oreja.</li> </ul>
Trituradora giratorias	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiales no fibrosos mínimo de 6 mm</li> </ul>

Trituradora de mandíbulas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Materiales no fibrosos mínimo de 6 mm</li></ul>
Trituradora de rodillos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Granos pequeños</li><li>• Preparación de cereales para consumo humano</li></ul>
Molino de rodillos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Triturar granos</li></ul>
Molino de martillos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Molienda eficiente en material fácil de desmenuzar</li><li>• Molienda eficiente en fibras</li><li>• Granos</li><li>• Maíz oreja</li><li>• Maíz de grano</li><li>• Etc.</li></ul>
Molino de tornillo sin fin	<ul style="list-style-type: none"><li>• Granos</li><li>• Carne</li><li>• Soya</li></ul>
Molino de bolas	<ul style="list-style-type: none"><li>• el chocolate</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• recubrimiento de confitería</li> </ul>
Órgano de corte de eje vertical para rastrojo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rastrojo</li> </ul>
Molinos Forrajeros De Tambor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Picado de forraje</li> <li>• Corte de gramíneas</li> </ul>
Molino de agujas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Harina de arroz</li> <li>• Almidones</li> <li>• Azúcares</li> <li>• Especias</li> <li>• Polvos vitamínicos</li> <li>• Granos</li> <li>• Productos friables</li> <li>• Granos</li> <li>• Raíz de cúrcuma</li> <li>• Semillas de cilantro</li> </ul>

Como se puede ver, hay molinos exclusivos para la trituración de granos, como lo son el molino de rodillos y la trituradora de rodillos, otros que pueden moler más materiales además de granos como lo son los molinos de tornillo sin fin, los molinos de martillos y los molinos de platos, incluso hay un molino exclusivo para chocolate y recubrimiento de confitería, el cual es el molino de bolas, hasta están los que Trituran materiales no fibrosos como lo son la trituradora giratorias y las trituradoras de mandíbulas; Pero cuando se refiere a la molienda de fibras, aunque los molinos forrajeros de tambor son usados para

picar este tipo de material, no puede pulverizarlo, llegando así a los únicos que lo pueden hacer, los cuales son los molinos de discos y los molinos de martillos, por este motivo, se hace otro estudio, con el fin seleccionar cual mejor desempeña la función de pulverizar bagazo de caña panelera.

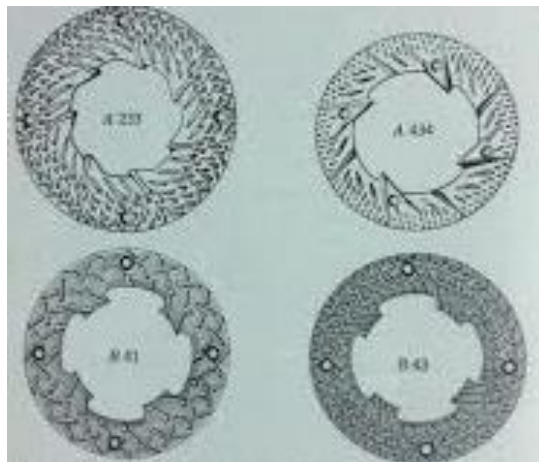
Para tal estudio se parte de la tabla 4, el cual hace un comparativo de ambos teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas:

**Tabla 4. Comparativo entre el molino de discos y el molino de martillos.**

Molinos	Ventajas	Desventajas
Molino de discos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las velocidades de operación son usualmente menores a 1200 rpm.</li> <li>• El costo de adquisición es muy bajo.</li> <li>• El material triturado puede llegar a ser muy uniforme.</li> <li>• Requiere baja potencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las estrías de los platos varían conforme sea el material a moler y la velocidad de molienda, una selección errónea de disco puede causar falla en la máquina. (Ver figura 14).</li> <li>• Sensible a que haya ruptura de las piezas debido a un material foráneo.</li> <li>• Si alguno de los discos se daña, se requiere un cambio de ambas para garantizar uniformidad, por lo que hace que el mantenimiento</li> </ul>

		correctivo sea costoso.
Molino de martillos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede producir tamaños de partícula menor que el molino de rodillos.</li> <li>• El molino de martillos es muy económico.</li> <li>• los gastos para mantenimientos son pocos.</li> <li>• Su funcionamiento es más sencillo.</li> <li>• que ofrece una amplia gama de tamaños de partícula.</li> <li>• El diseño del molino de martillos es sencillo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto consumo de energía eléctrica.</li> <li>• Baja eficiencia de corte.</li> <li>• Es ruidosa.</li> <li>• Produce mucho calor.</li> <li>• Produce polución.</li> <li>• Se obtiene tamaños de partículas no homogéneas.</li> <li>• La criba aunque controla el tamaño de grano, si el material a moler está muy húmedo, se puede estancar en la criba impidiendo el paso de material molido y ocurriendo así una falla.</li> </ul>

Para la molienda de un material aplicando molinos de discos, es importante saber que, para cada tipo de material a moler, es importante conocer la geometría de las estrías del disco que vaya a cumplir esta tarea, ya que la selección incorrecta de la misma, puede generar fallas en la máquina o ineficiencia en el proceso. Para tal selección se tiene en cuenta la figura 17, la cual ilustra los diversos tipos de platos y sus aplicaciones.

**Figura 16. Los tipos de platos. [24]**

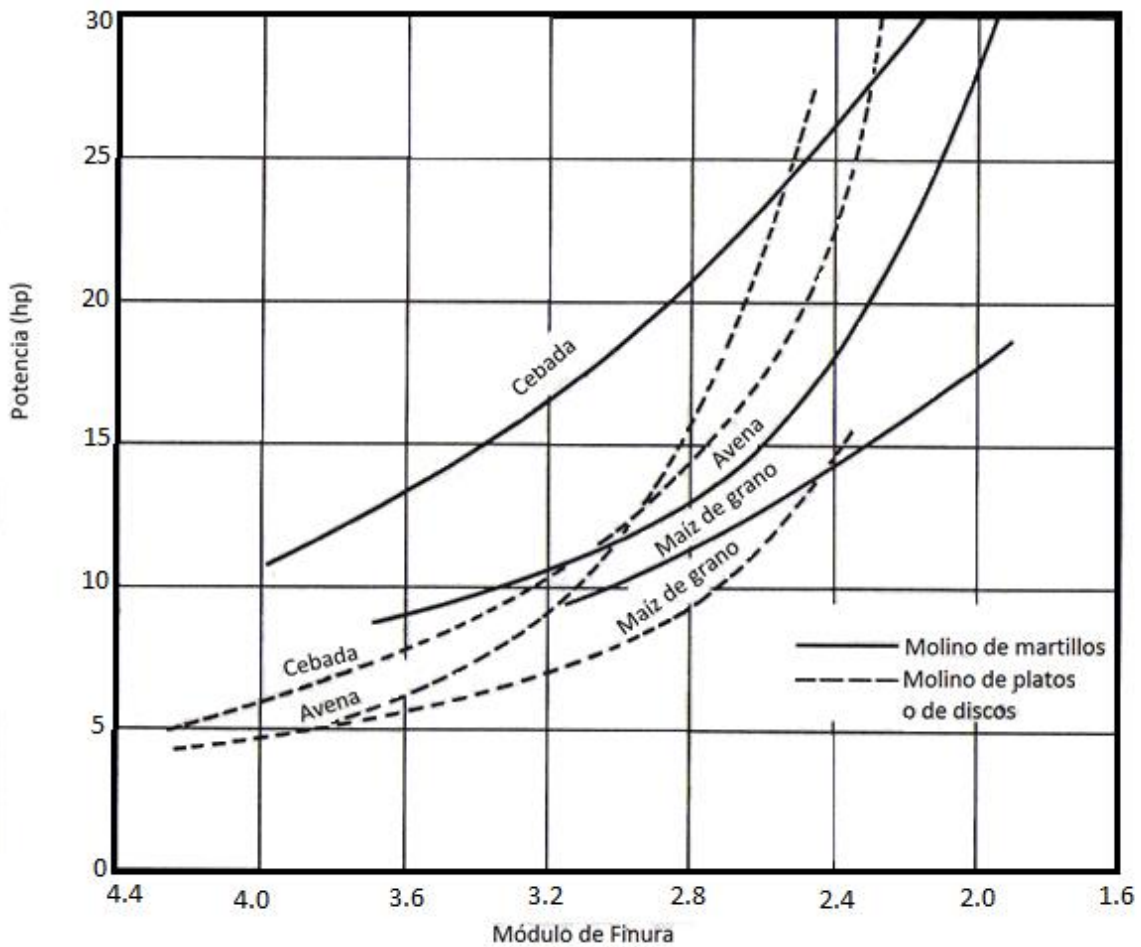
Henderson y Perry [24] referencia el plato como A 233 (superior izquierda) tiene como función moler pequeños granos y para maíz oreja; el plato A 434 (superior derecha) es usado para la molienda fina y media de granos pequeños, maíz oreja, fibra celulósica, y para molienda de alta capacidad; La B41 (inferior izquierda) es para molienda gruesa uniforme de pequeños granos y maíz oreja; Finalmente, la B43 (inferior derecha) es usado para la molienda extrema fina de granos pequeños secos y maíz oreja seca. Con lo anterior se concluye que el tipo de disco más adecuado para la molienda de bagazo de caña panelera sería el A 434.

Una ventaja sobresaliente que tiene el molino de platos es que puede moler material con altos a índices de humedad, mientras que el molino de martillos puede ocurrir una falla, ya que el material se puede estancar en la criba, ocurriendo así una obstrucción de material que impida que el material molido pase.

Ahora bien, ahora para comparar los requerimientos de potencia de ambos, se toman entonces la gráfica de la figura 17; De allí se puede ver que para el caso de la molienda fibras (cebada en este caso) si el tamaño de partícula tiene un módulo de finura cercanos de 4 hasta valor aproximado a 2,3 (donde ambas máquinas tiene una potencia 28,2 hp aproximadamente) se puede ver que es notablemente menor la potencia requerida del molino de platos que el molino de martillos, pero en el intervalo de módulo de finura de 2,3 hasta 2, se puede observar que el molino de martillos requiere menor potencia que el molino de platos, lo que significa que entre menor sea el tamaño de partícula deseado del

material a moler, el molino de martillos requiere de menos potencia para el caso de fibras celulósicas, algo lo cual es muy ventajoso para el molino de martillos ya que para el proceso de pelletizado se desea que el tamaño del material molido sea el menor posible para que el proceso de extrusión sea más efectivo.

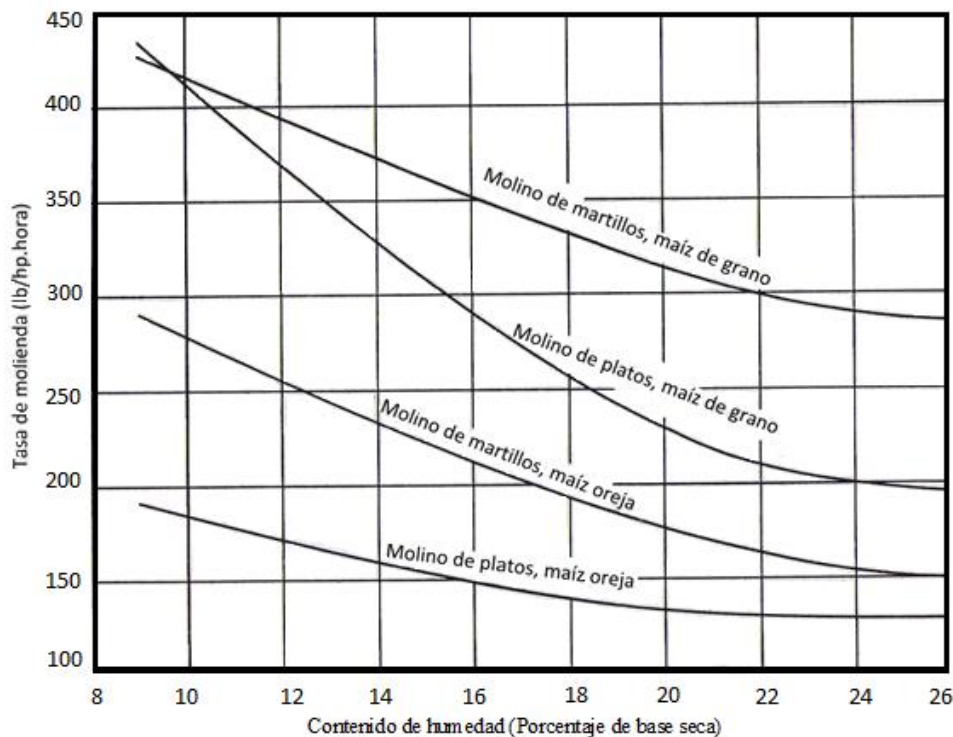
**Figura 17. Gráfica comparativa entre el molino de platos con el molino de martillos en la molienda de tres tipos de granos diferentes. [24]**



Continuando con el mismo análisis, en la figura 18 se observa la relación entre la tasa de molienda y el porcentaje de humedad en la molienda de maíz de grano y maíz e oreja, en donde se concluye que en ambos tipos de maíz el molino de martillos puede generar un tamaño de grano menor con relación al molino de platos sin importar el porcentaje de humedad, aunque es importante notar que entre menor sea el porcentaje de humedad, menor es el tamaño de grano, ya que a mayor tasa de molienda, significa que puede

producir menor tamaño de grano, por ende, mayor cantidad de polvos finos. El único momento en el cual el molino de platos supera el molino de martillos en producción de polvos finos, es en la molienda de maíz de grano en el intervalo de porcentaje de humedad entre 5 y 9,46, ya que la tasa de molienda lo supera aproximadamente en  $7,6 \frac{lb}{hp \cdot h}$ , lo cual se puede considerar que lo supera en muy poca magnitud.

**Figura 18. Efecto del contenido de humedad en la capacidad de los dos molinos.[24]**



En cuanto al mantenimiento correctivo, ambos se caracterizan que se necesitan detener la producción para que se pueda hacer los cambios respectivos de las piezas que se encargan de la molienda del material, pero lo que los diferencia en el proceso es que el cambio de los martillos es más sencillos que hacer el cambio de los platos, ya que para un cambio de platos se requiere de desensamblar casi toda la máquina para el proceso, mientras que el molino de martillos sólo requiere de sacar el eje de la máquina y cambiar los martillos que se requieren cambiar. Además, cabe resaltar que los martillos tienen un costo mucho más bajo que el costo de los discos, debido a que la geometría de los discos es más compleja que la de los martillos.

Por todo lo anterior se concluye que el molino más adecuado para la molienda es el molino de martillos.

## 2.4 Análisis de estudios previos de molinos de martillos

Basado en el resultado obtenido anteriormente, es vital conocer que estudios previos se han hecho con el molino de martillos para aumentar la eficiencia de corte y/o reducir el consumo de potencia eléctrica, para evitar repetir algún trabajo ya hecho por otra persona.

Se inicia partiendo el estudio hecho por Jannash [12] el cual fue hecho en el año 2001, el donde molió usando un molino de martillos moliendo mijo, para la paja de trigo y rastrojo de maíz, el donde concluyó que si satura el flujo de alimentación podría aumentar la eficiente de corte en un 66,71%, definiendo como eficiencia de corte, la reducción de tamaño de partícula, obteniendo consecutivamente, mayor cantidad de polvos finos.

Bitra et al [16] en el año 2009, de manera experimental se obtuvo valores de eficiencia de corte de 26.48% moliendo mijo, 28.96% con la paja de trigo y 24% con el rastrojo de maíz, operando el motor a una velocidad de 1500 RPM; Pero al aumentar la velocidad del motor a 3500 RPM, la eficiencia de corte aumentó, obteniendo resultados de 30% moliendo mijo, 37% con la paja de trigo y 45% con el rastrojo de maíz.

Yancey et al [18] en el año 2013, llegó descubrió que al aumentar la longitud del martillo, la capacidad de producción y la eficiencia de corte podrían aumentar hasta un 400%, es decir, cuatro veces a la eficiencia de corte de un molino de martillos convencional, teniendo en cuenta que para este resultado molió mijo, para la paja de trigo y rastrojo de maíz.

Barnwal et al [49] llegó que entre al moler material, entre menor sea el porcentaje de humedad del material, mayor eficiencia de corte y menor es el consumo de potencia de la máquina, además concluyó que las propiedades térmicas del material (por ejemplo, coeficiente de calor específico del material, la temperatura de ebullición latente de los fluidos dentro de la muestra, etc) influyen en la eficiencia de corte y en el consumo de potencia del molino, ya que durante la molienda se libera altos niveles de calor producto de la fuerza de fricción entre los martillos y el material a moler. Para este resultado hay que tener en cuenta que en los experimentos se molió semillas de cilantro.

Naimi et al [17], en el año 2016, hizo un experimento que consistía en medir el consumo de potencia del molino de martillos mientras molía aserrín de madera de pino variando la criba, concluyendo que entre más mayor sea el área abierta, es decir, entre mayor sea el área de los agujeros donde pasa las partículas, menor es el consumo eléctrico del material, teniendo en cuenta que para este modelo aplicó el modelo de Rittinger, el cual está descrito en la ecuación 12.

$$E = K_R \left( \frac{1}{L_p} - \frac{1}{L_f} \right) \quad (12)$$

Donde:

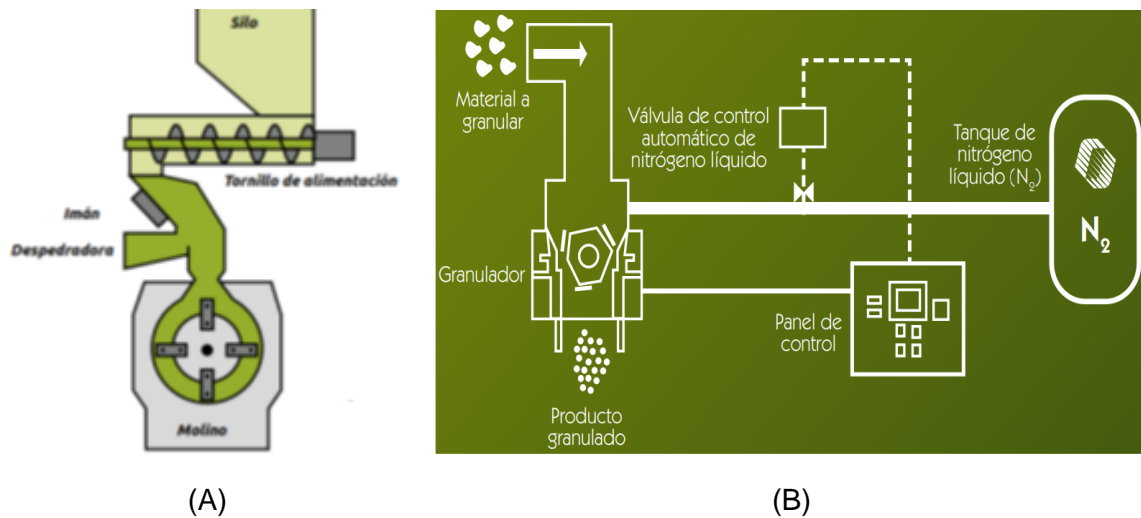
$K_R$ : Constante de Rittinger, el cual depende de la relación entre el tipo de máquina que hace la molienda y el material a moler, molino de martillos y aserrín de madera de pino en este caso. El valor numérico para este caso es  $18,7 \frac{KW \cdot h}{t} = 67,3 \frac{J \cdot mm}{g}$ .

$L_p$ : Es el diámetro de las partículas que pasan por la criba, por lo general es

$L_f$ : Es una longitud característica o diámetro de la muestra a moler.

Chávez Vela y Ramos Vásquez [52] en el estado de arte de su trabajo investigativo para el diseño de un molino de martillo para la molienda de cereales y forraje, hallaron que la empresa Tesla Intelligent Energy European, en el año 2014 que al conectar en serie un molino tornillo sin fin con un molino de martillos aumenta la eficiencia de corte, ya que el tornillo sin fin hace una premolienda del material, garantizando así un tamaño de grano más pequeño, por ende, una mayor cantidad de polvos finos, tal como se observa en la figura 19 A. Durante el mismo estado de arte encontraron además, que la empresa CRIOINFA, en el año 2015, propone en su diseño de molino de martillos se introduzca un sistema el cual congela el material a moler con nitrógeno líquido con el fin de solidificar los líquidos que tiene internos las muestras a moler y además debilita la estructura de las mismas, haciendo que la eficiencia de corte sea mayor y haya una considerable reducción de consumo de potencia en el molino, tal como se observa en la figura 19 B.

**Figura 19. Estudios previos de aumento de eficiencia de corte en molinos de martillos [52]**



Finalmente, en el año 2018, Atarama et al [53] en su proceso de diseño de molino de martillos concluyó, que entre menor sea el número de martillos a seleccionar, el volumen de la máquina también, afectando el peso de la misma, ocurriendo en consecuencia que el potencial de consumo eléctrico se reduzca cuando vaya a moler la misma cantidad de material, que en este caso fueron granos.

Con lo anterior, se puede afirmar con certeza que aún se desconoce algún tipo de estudio que busque reducir el consumo de potencia y aumentar la eficiencia de corte en un molino de martillos moliendo caña panelera cambiando la geometría de los martillos.



## **3. Capítulo 3: Modelamiento matemático del martillo**

### **3.1 Introducción**

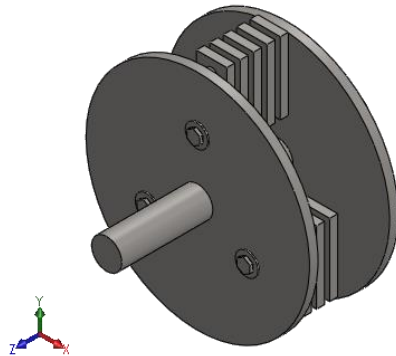
La optimización es un proceso el cual se aplica para rediseñar una pieza con el fin de maximizar o minimizar una de las funciones cambiando la geometría de la misma a través de un proceso matemático. Para tal propósito es importante la caracterización de la máquina en la cual va intervenir la pieza para conocer las condiciones en las cuales va operar, luego se pasa a un segundo paso que consiste en encontrar un modelo matemático el cual relacione la geometría de la misma con su funcionamiento, con ello las restricciones que tendrá la misma para que luego finalmente se haga el proceso de optimización usando el modelo matemático para encontrarse así la geometría final. Los pasos anteriores serán aplicados en los martillos del molino con el fin de aumentar la eficiencia de corte cambiando la geometría de las mismas.

### **3.2. Descripción del molino de martillos**

Para el proceso de optimización es importante conocer la máquina en dónde actuará la pieza, para ello es importante conocer las características más importantes del molino de martillos en este caso.

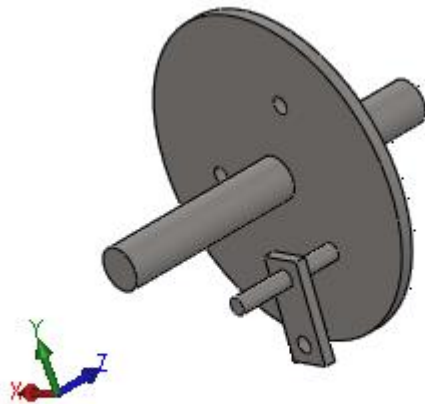
El sistema principal interno del molino de martillo que se usó en los experimentos consta de dos discos, denominados tambores, los cuales poseen en el intermedio de ellos tres ejes con cinco martillos unidos a ellos de manera holgada, y en el medio de los tambores los atraviesa el eje principal, el cual está soldado, éste se encarga de transmitir la energía al sistema que envía el motor cuando está en operación, tal como se observa en la figura 20.

**Figura 20. Estructura interna del molino de martillos hecho en Solidworks.**



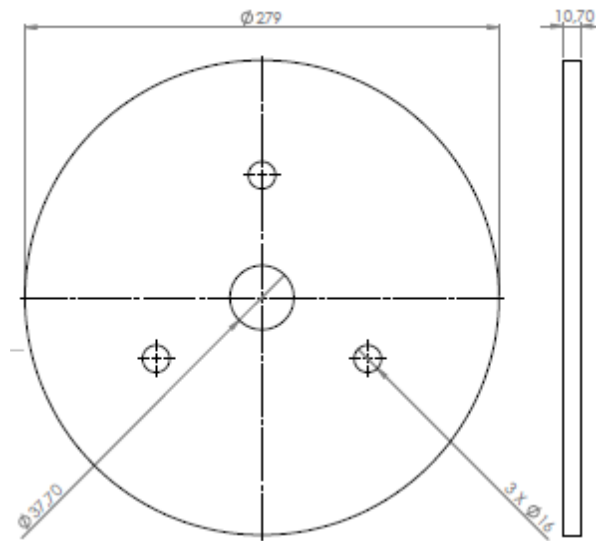
Para mayor compresión, se puede ver en la figura 21, la cual explica cómo va unido el martillo en cada eje pequeño de manera holgada, el propósito de este tipo de ensamble es garantizar que los martillos tengan la inercia necesaria para producir los golpes que genera el mol

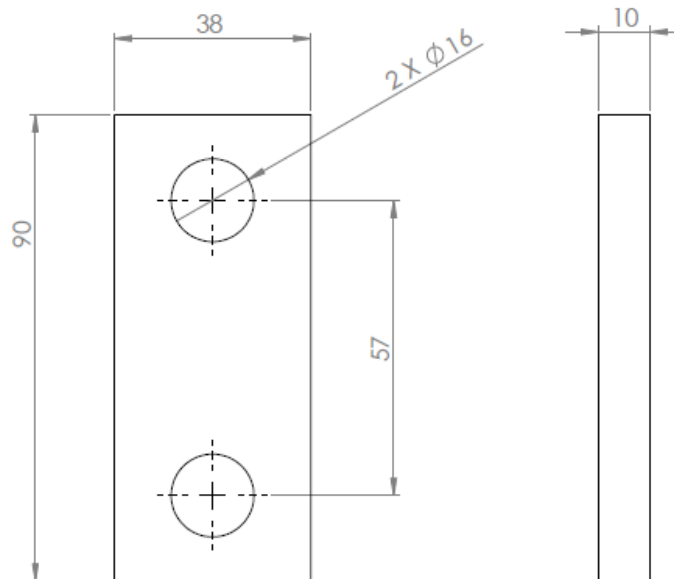
**Figura 21. Vista interna de un martillo dentro del sistema.**



Cada placa cilíndrica, o tambor, tiene una masa de 5048,94 g, y un momento de inercia de 50139747,38 g\*mm<sup>2</sup>; el plano de diseño del mismo se puede ver en la figura 20. Para conocer la información del martillo, la figura 21 muestra el plano del mismo, teniendo en cuenta que ambas piezas están hechas en acero AISI 1020.

Figura 22. Plano del disco



**Figura 23. Martillo con las dimensiones en milímetros**

Hay que tener en cuenta que cada martillo tiene una masa de 254,89 gramos y un momento de inercia de  $206307,04 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$  con respecto al centro.

### 3.3. Caracterización de la potencia del molino de martillos con respecto a la carga

En el momento, para el caso de molinos de martillos aplicado en la agroindustria, la única manera de medir el consumo de potencia se ha aplicado es la ecuación de Rittinger, la cual está descrita en la ecuación (12), porque en la molienda muy fina es la que mejor se correlaciona con los resultados experimentales, tal como lo afirma Naimi et al [17]. Otros estudios realizados sobre medición de consumos de potencia aplicados en máquinas agrícolas, Ozkan et al [54] propone medir la energía de entrada usando como variables el peso de la máquina y la vida económica de la misma. Otros estudios miden diversas características de la máquina agrícola durante el funcionamiento, para finalmente, obtener la potencia de la misma en función de estas; el cual se denomina método Nebraska. Chaparro Castro [55] afirma además que este es el más aplicado para conocer la potencia

de los tractores. Z. Chen [56] propone otra metodología para medir potencia, aplicada en una turbina eólica, el cual mide los variables a través de un modelo de ecuación simple de movimiento, depende de factores como la densidad del viento, la velocidad del mismo, el área de barrido de los álabes de la turbina, entre otros.

Con el fin de a futuro mejorar el funcionamiento del molino de martillos para procesar bagazo de caña de azúcar, es importante caracterizar primero su funcionamiento, teniendo en cuenta que este material, no se aplicó la ecuación de Rittinger, ya que no se pudo obtener muestras las cuales tengan la misma geometría debido a varios motivos, los cuales fueron los siguientes:

- Durante la extracción de jugos en las cañas los bagazos sufrieron diversos tipos de fracturas, la cual hace que las geometrías de las muestras de bagazo sean diferentes.
- Cada caña tiene longitud y cantidad de jugos diferente en sus formas naturales, por ende, los bagazos presentan diversas conformaciones después de la extracción de jugos.
- Su forma fibrosa y a la fuerte unión entre fibras lo que genera dificultades en cortar las muestras para obtener muestras similares
- La estructura de la parte externa de la caña es completamente más dura que las fibras internas, otra razón por la cual dificulta obtener muestras con las mismas formas en el mismo bagazo.

Por los motivos anteriores se recurrió caracterizar la potencia con otra variable más sencilla de medir, como lo es su peso, es por ese motivo que se obtuvo un modelo de potencia en función de la carga.

### **3.3.1. Materiales**

La potencia en el molino fue cuantificada midiendo el voltaje y el amperaje en el motor empleando una pinza volti-amperimétrica, la cual mide con respecto el tiempo variables como el voltaje, la corriente o amperaje, y el coseno del ángulo de desfase entre estos. Se realizaron experimentos por lotes introduciendo en el molino una determinada cantidad de bagazo cada 60 segundos. La cantidad de bagazo fue medida utilizando una pesa gramera

EK 5015 Electronic Kitchen Scale (Hopex Werkzeuge, Germany), con capacidad de 5 kg y con una resolución de 1 g. La Tabla 5 muestra las características de la pinza voltiamperimétrica, la Tabla 6 describe la gramera de cocina usada en el experimento para pesar las muestras; la Tabla 7 muestra las características del tacómetro utilizado en las pruebas; también se caracterizó el molino de martillos y el bagazo de caña, en las respectivas tablas 8 y 9.

**Tabla 5. Caracterización de la pinza volti - amperímetra**

<b>Marca</b>	UNI - T
<b>Modelo</b>	UT 243
<b>Rangos Voltaje AC</b>	150 V - 600 V
<b>Exactitud Voltaje AC</b>	$\pm (1.2\%+5)$
<b>Resolución Voltaje AC</b>	0.1 V
<b>Impedancia de entrada Voltaje AC</b>	5M $\Omega$
<b>Rango Frecuencia</b>	40 Hz – 80 Hz
<b>Exactitud Frecuencia</b>	$\pm (0.5\%+5)$
<b>Resolución Frecuencia</b>	0.01 Hz
<b>Rangos Corriente AC</b>	50 A - 1000 V
<b>Exactitud Corriente AC</b>	$\pm (2\%+5)$
<b>Resolución Corriente AC</b>	0.1 A (para 50 A y 250 A) 1 A ( para 1000 A)

<b>Rango del ángulo de fase de localización</b>	0° – 360°
<b>Exactitud del ángulo de fase de localización</b>	± 2°
<b>Resolución del ángulo de fase de localización</b>	1°
<b>Rango energía eléctrica</b>	1 ~ 9999 KWh
<b>Exactitud energía eléctrica</b>	± (3%+2)
<b>Resolución energía eléctrica</b>	0.001 KWh
<b>Rango de factor de potencia</b>	0.3 ~ 1
<b>Exactitud de factor de potencia</b>	± 0.022
<b>Resolución de factor de potencia</b>	0.001

**Tabla 6. Caracterización de la gramera de cocina**

<b>Marca</b>	Hopex Werkzeuge Germany
<b>Modelo</b>	Electronic Kitchen Scale Ref: EK 5055
<b>Capacidad</b>	5 Kg

<b>Precisión</b>	$\pm 1$ g
------------------	-----------

**Tabla 7. Caracterización del tacómetro**

<b>Marca</b>	Iminipa	<b>Modelo</b>	MDT – 2238 A
<b>Rango</b>	<b>Foto</b>	<b>Contacto</b>	<b>Superficie</b>
	0.1 (2.5 a 999.9 RPM) 1 RPM (arriba de 1000 RPM)	0.1 RPM (0.5 hasta 999.9 RPM) 1 RPM (arriba de 1000 RPM)	0.01 m/min (0.5 a 99.99 m/min) 0.1 m/min (arriba de los 100 m/min)
<b>Resolución</b>	2.5 a 99999 RPM	0.5 a 19999 RPM	0.5 a 19999 m/min
<b>Precisión</b>	$\pm (0.05\% \text{ lectura} + 1 \text{ dígital})$		

**Tabla 8. Caracterización del molino de martillos usado en el experimento**

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Marca	ASEA
Modelo	IEC 34 IP54 MT100L128-4
Clase	F
Potencia	3,2 KW
Velocidad angular	1730 RPM
VY: Voltaje en con conexión en estrella	380
Corriente (VY)	5,2 A
VΔ: Voltaje con conexión en delta	220
Corriente (VΔ)	9 A
Cos $\varphi$	0,76
Dimensiones del martillos	90 mm X 38 mm X 10 mm
Número de martillos	15

**Tabla 9. Caracterización del bagazo de caña [57]**

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Valor promedio</b>
Humedad a 105°C (%)	7,57 ± 0,19
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	69,7 ± 0,0069
Densidad real (kg/m <sup>3</sup> )	165,6 ± 0,99
Porosidad	0,60 ± 1,4 x 10 <sup>-5</sup>
Flotabilidad	Sí

### 3.3.2. Metodología

Para los experimentos, se tomó muestras de bagazo de caña con una misma cantidad de masa conocida, las cuales se introducen en la máquina durante un tiempo descrito; Para el experimento siguiente se repite el procedimiento anterior, pero con muestras con mayor peso, tal como lo describe la tabla 10, donde se caracteriza todos los experimentos hechos en esta unidad.

**Tabla 10. Descripción de los experimentos para caracterizar la potencia con respecto a las cargas**

<b>Número de experimento</b>	<b>Cantidad de masa a moler (g)</b>	<b>Número de muestras</b>	<b>Tiempo en el cual se arroja la muestra</b>
1	0		Aproximadamente 3 minutos
2	12	5	Cada 60 segundos
3	24	5	
4	48	5	
5	72	5	Las tres primeras muestras cada 60

			segundos, la cuarta muestra a los 120 segundos, y la última, 60 segundos después
--	--	--	--

Para obtener el modelo es importante caracterizar el molino de martillos para así obtener no sólo la potencia eléctrica del mismo, aplicando la ecuación (11), sino también para conocer otros factores que pueden afectar el mismo, por tal motivo se hicieron los montajes los cuales están descritos a continuación:

$$Pot = |V \times I \times \cos(\phi)| \quad (13)$$

Donde:

$V$ : Voltaje (V)

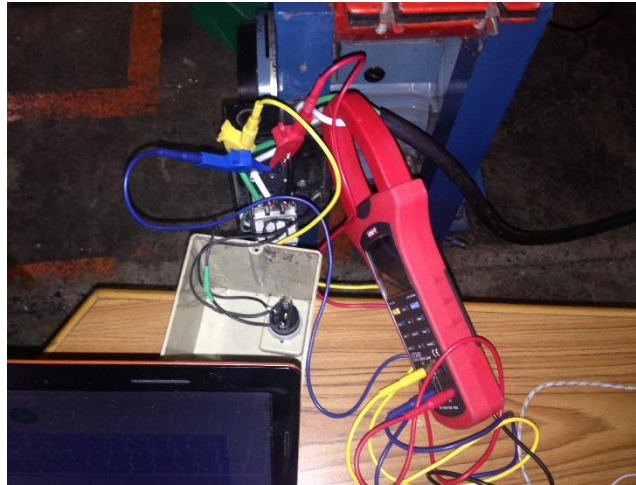
$I$ : Corriente o amperaje

$\phi$ : Ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente

$Pot$ : Potencia en valor absoluto (W)

- Para medir voltaje, corriente y  $\cos(\phi)$ :

Para obtener estas medidas se hizo el montaje descrito en la figura 22, el cual se hizo en la caja donde está el sistema de encendido del motor de la máquina, en el cableado que está conectado a las fases; tal montaje consiste en cruzar en la parte interna de la pinza el cable que está conectado a la fase que emite mayor corriente, luego, cada cocodrilo eléctrico se conecta a la fase que le corresponda, ya que según las instrucciones del equipo, cada cocodrilo sólo puede medir una fase específica, luego se configura la pinza voltiamperimétrica para que mida de manera consecutiva el voltaje, el amperaje y el coseno del ángulo de desfase, datos que finalmente llegan en una hoja de cálculo al computador que está conectado con el instrumento de medición.



**Figura 24. Foto donde se describe el montaje que se hizo en el cableado el cual se encarga de entregarle energía eléctrica al motor..**

- Para medir velocidad angular:

Se adhiere un pegante cuadrado blanco en el borde de las poleas, una la cual está vinculada al eje de transmisión donde está los martillos y otro con el eje del motor, luego, con el haz de luz láser el cual el tacómetro lanza cuando está encendido, lo apunta en el pegante de tal manera que el tacómetro quede al frente de la polea, cuando el molino de martillos se encienda, en la pantalla del tacómetro se podrá ver la velocidad de rotación de la polea en RPM.

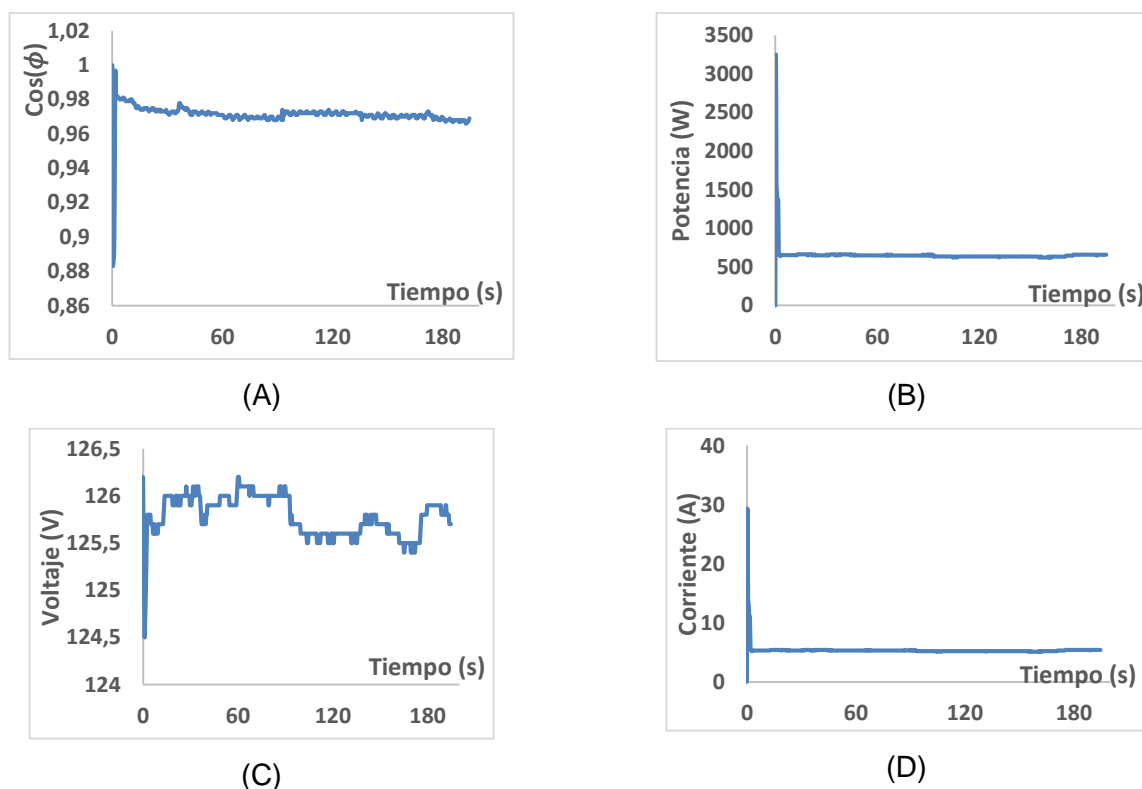
- Para medir la eficiencia de corte

Después de cada experimento, se pesa la cantidad de polvo fino de bagazo que pasa por la criba después de cada experimento, luego se relaciona con la cantidad de masas totales usadas en cada experimento aplicando la ecuación 14.

$$\frac{\text{peso de polvos finos}}{\text{peso suma de masas por experimento}} \times 100\% \quad (14)$$

### 3.3.3. Resultados

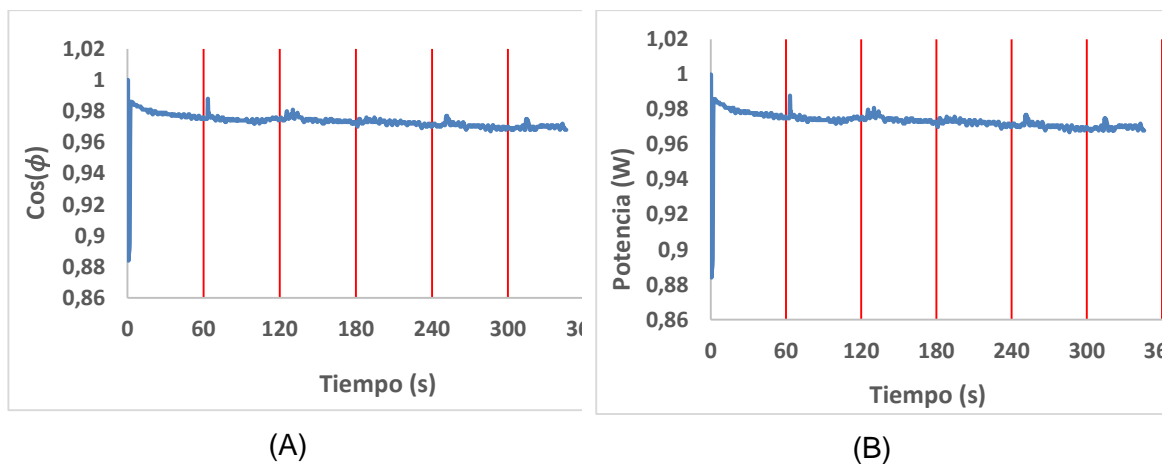
**Primer experimento.** Sin tener en cuenta el momento de arranque, si se analiza la Figura 3A, se observa que el intervalo en que varía el coseno del ángulo de desfase con respecto al tiempo es pequeño, ya que el punto más bajo de la gráfica está en un poco más arriba de 0.96 y el pico más alto está en 0.98. En cuanto a la Figura 3C pasa algo similar, debido a que el voltaje se ubica entre el intervalo 125.5V hasta 126V durante el transcurso del tiempo. En cuanto a la figura 3D, ésta no presenta cambios durante el tiempo. Si se analiza la gráfica 3B, la cual se hizo usando la ecuación (Ec 1), se concluye que al tener unos intervalos tan pequeños tanto el Voltaje como el Coseno del ángulo de desfase, la potencia no presenta variaciones significativas con respecto al tiempo.

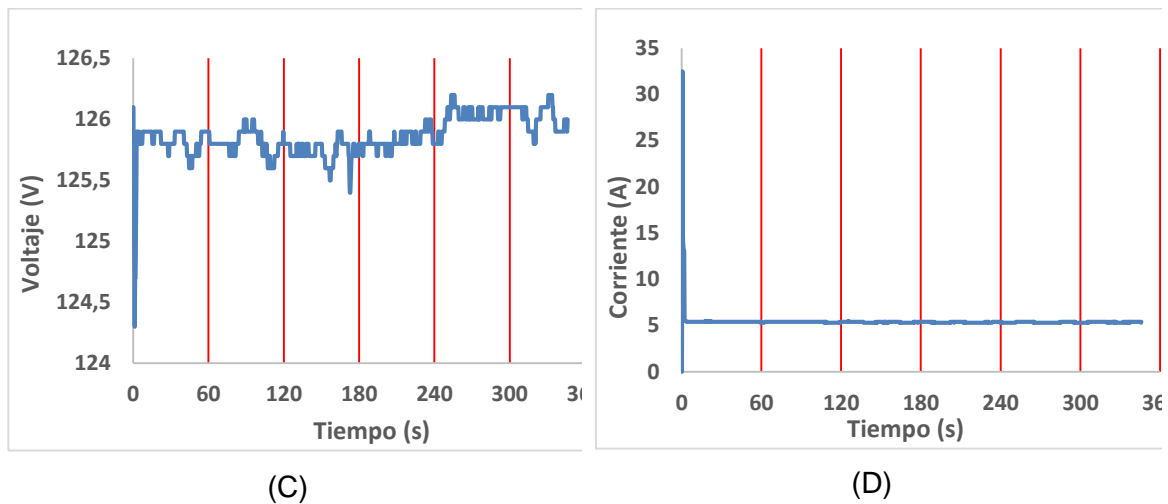


**Figura 25. Resultados obtenidos en el primer experimento**

4. **Segundo experimento.** Teniendo en cuenta que se desprecia el momento de arranque y que además están marcados con líneas rojas los instantes en que se

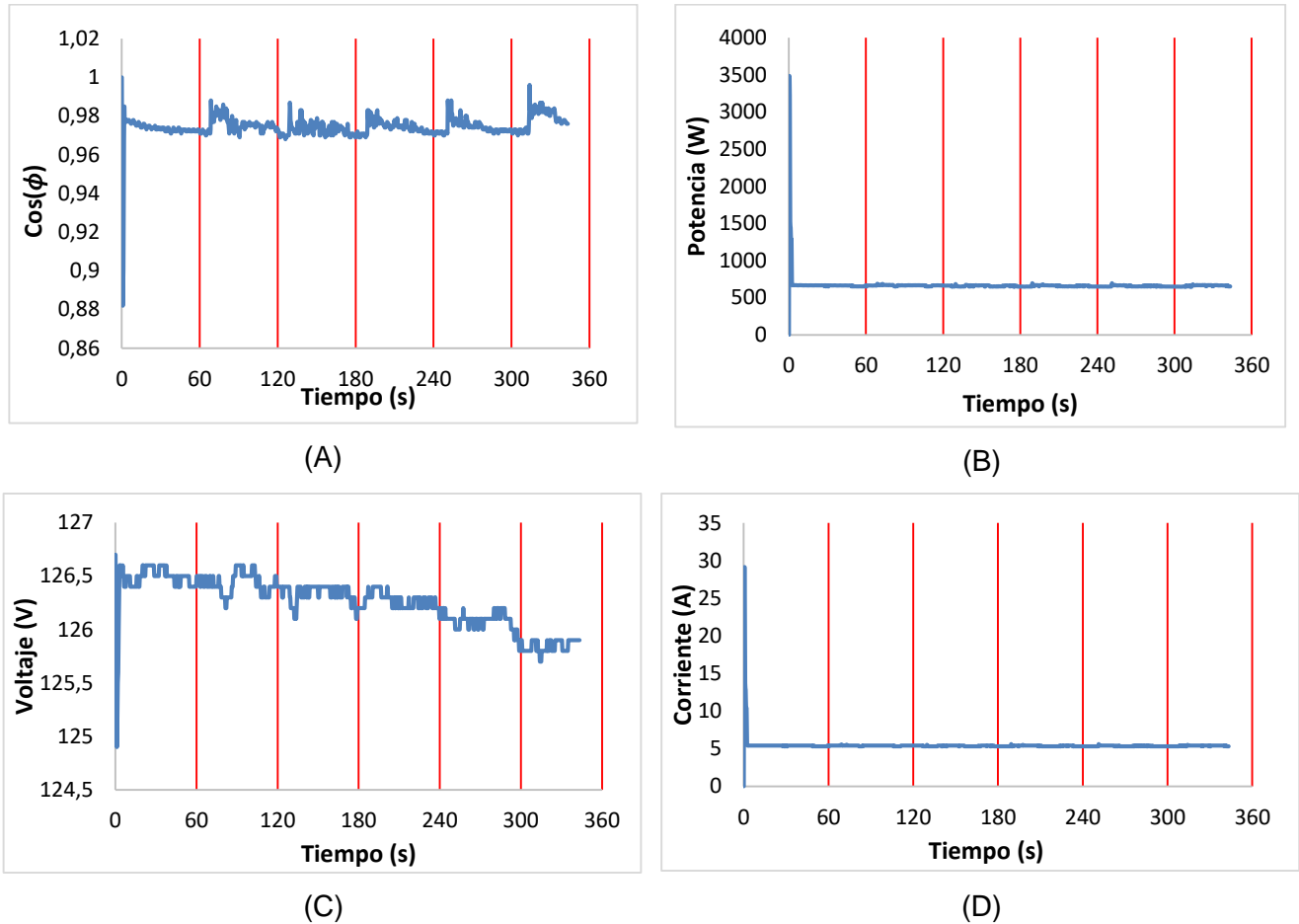
introdujo las muestras de 12 g para ser trituradas, la figura 4A se aprecia como decrece con respecto al tiempo, aunque con picos en los instantes posteriores al ingreso de las muestras en el molino. La figura 4C se observa como el voltaje aumenta con el tiempo, en especial después de ingresar la cuarta muestra, donde el aumento es mayor. La figura 4D no presenta cambios con respecto al tiempo. La figura 4B, muestra los picos en los instantes después de que se introdujo las muestras al molino, esto se debe a los cambios en el Voltaje y el Coseno del ángulo de desfase; además se aprecia una estabilización de la potencia con el tiempo. Las variaciones del voltaje en son pequeños, razón por la cual influye poco en las magnitudes de la potencia; con la corriente ocurre lo mismo debido a que no presenta cambios en el tiempo, por ende, el que más influye con el comportamiento es el coseno del ángulo de desfase, razón por la cual las figuras 4A y 4B son tan similares.





**Figura 26. Resultados del segundo experimento teniendo en cuenta que las líneas rojas describen los momentos los cuales introdujeron las muestras al molino**

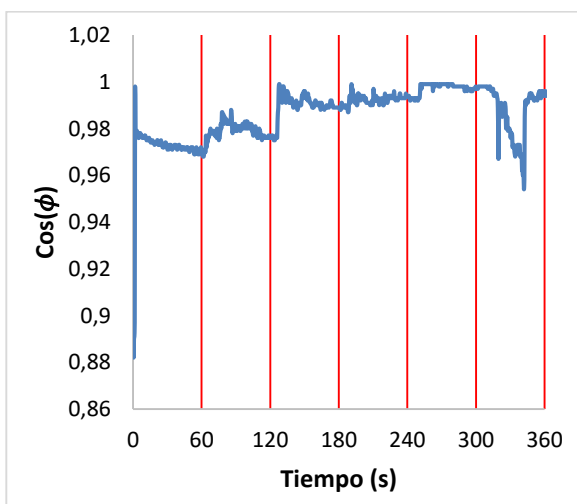
5. **Tercer experimento.** Para el siguiente análisis se debe tener en cuenta que el momento de arranque se desprecia y que además las líneas rojas denotan los instantes en los cuales las muestras de 24g fueron arrojados en el molino para ser trituradas. La figura 5A muestra como el coseno del ángulo de desfase va aumentando paulatinamente con respecto al tiempo, además de que hay picos que sobresalen en los instantes después de que las muestras son puestas en la máquina. La figura 5C muestra como el voltaje se reduce con respecto al tiempo, en cambio la figura 5D muestra que la corriente no presenta ningún cambio en el tiempo. La figura 5B, muestra que el valor de la potencia se puede considerar estable con respecto al tiempo, ya que el valor del mismo no presentó variaciones significativas.



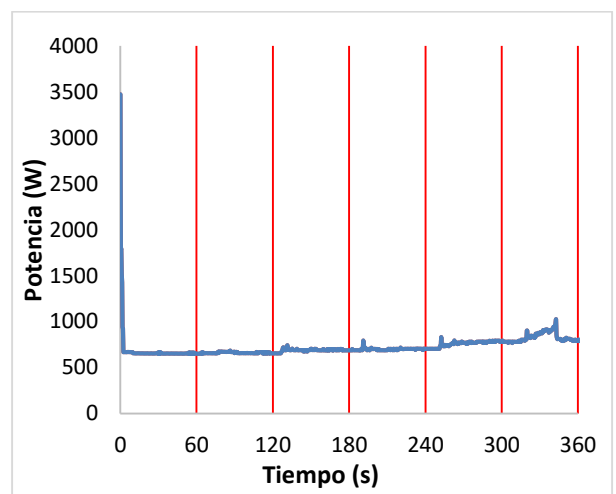
**Figura 27. Resultados del tercer experimento teniendo en cuenta que las líneas rojas describen los momentos los cuales introdujeron las muestras al molino**

6. **Cuarto experimento.** Teniendo en cuenta que se despreció el momento de arranque durante el análisis y que se marcó con líneas rojas los instantes en los cuales las muestras de bagazo de 48g fueron arrojados en el molino para ser triturados, la figura 6A muestra como el Coseno del ángulo de desfase va aumentando mientras el molino iba triturando las muestras, y en el instante después de triturar la quinta muestra, este reduce hasta llegar al punto más bajo de la gráfica, en cambio en la figura 6C se puede apreciar cómo va disminuyendo el voltaje con respecto al tiempo, aunque hay un pequeño aumento en el instante después de introducir la cuarta muestra, pero después de ese momento, sigue disminuyendo. En cuanto a la figura 6D, por primera vez se observa cambios en la

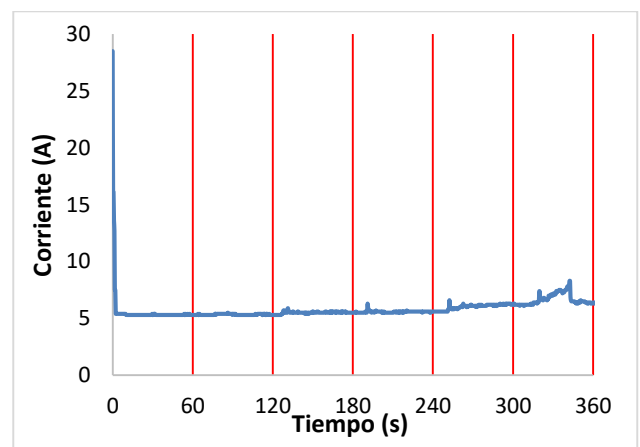
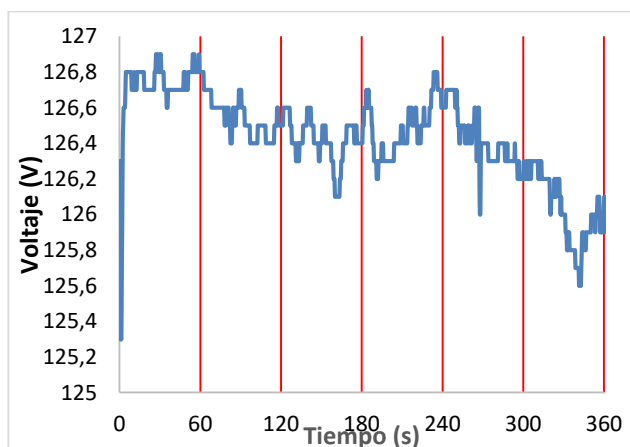
corriente, ocurriendo un aumento paulatino, además, se encontró picos en los instantes en que el molino empezó a triturar las muestras, pero en especial cuando se trituró la cuarta muestra, donde muestra un sobresalto, el cual continúa incluso cuando el molino tritura la quinta muestra. Los cambios en el voltaje, corriente y ángulos de desfase al introducir la cuarta muestra al molino, revelan que este tamaño de carga empieza a exigir mayor consumo de potencia y que la máquina comienza a saturarse. El motivo de todos estos cambios es por efecto de acumulación, debido a que, al ser unas muestras grandes para la capacidad de la máquina, ésta no trituraba en los 60 segundos toda la primera muestra, por ende, cuando se le introducía la siguiente, el molino trituraba la muestra recién arrojada más una parte de la muestra anterior.



(A)



(B)

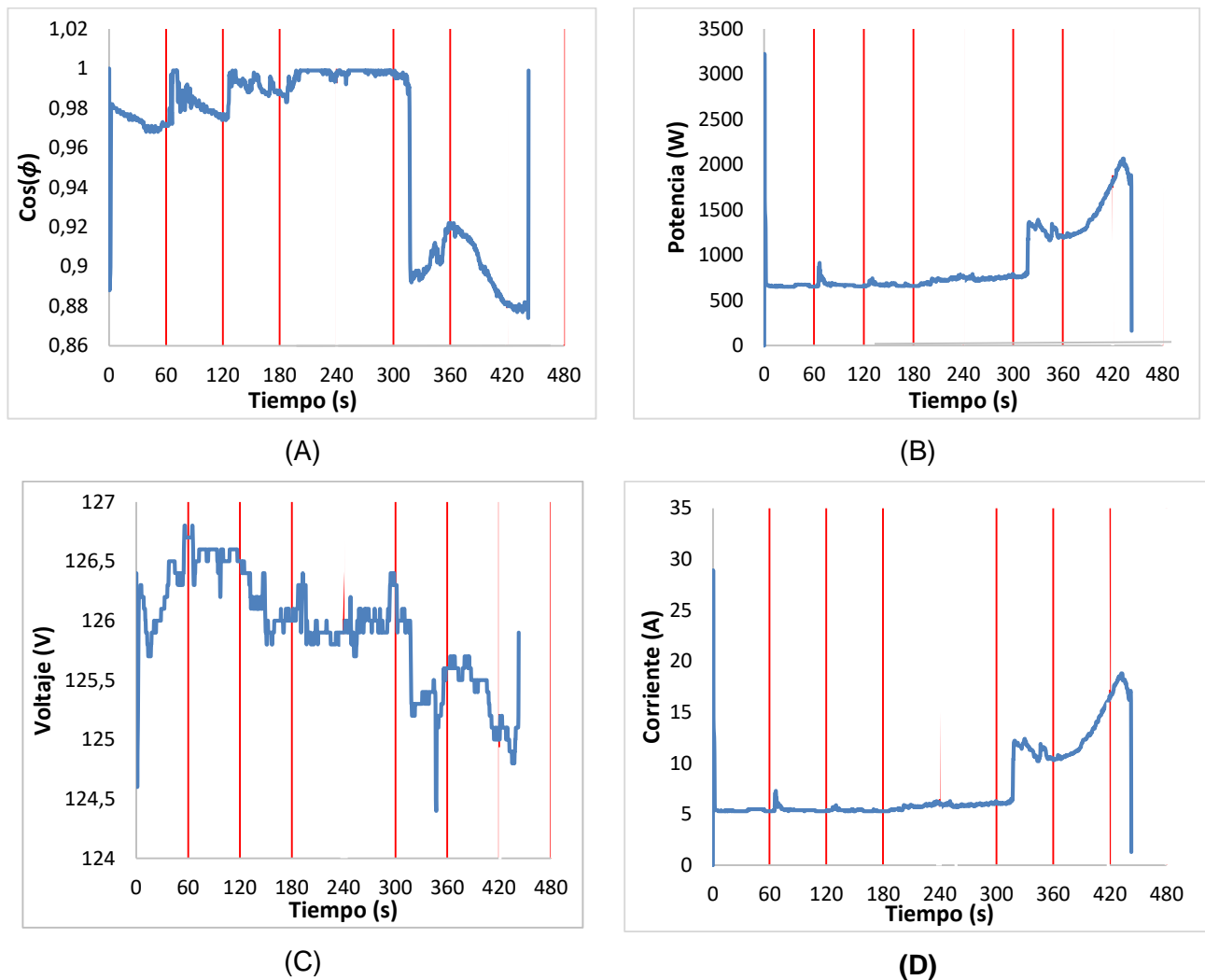


(C)

(D)

**Figura 28. Resultados del cuarto experimento teniendo en cuenta que las líneas rojas describen los momentos los cuales introdujeron las muestras al molino**

7. **Quinto experimento** Hay que tener en cuenta que este es el experimento que tiene las muestras más pesadas con respecto a las anteriores, ya que cada una pesa 72 g. Igual que en los casos anteriores, no se considera el momento de arranque y los momentos en que se ingresaron las muestras al molino están señaladas con líneas rojas en la Figura 7. En la Figura 7A se aprecia el incremento que tiene el coseno del ángulo de desfase después de triturar la primera muestra, En la figura 7C se aprecia el incremento en el voltaje en el momento después de triturar la primera muestra, luego decrece paulatina con respecto al tiempo, obteniendo el valor más bajo de voltaje después de triturar la cuarta muestra, aunque hay un intento de incrementar después de triturar la quinta muestra, no llega alcanzar el punto más alto de la gráfica. En la figura 7D se aprecia como la corriente, aunque trata de estar estable, hay pequeños picos después de triturar las primeras tres muestras, pero después de la cuarta muestra este incrementa considerablemente, incremento que continúa incluso después triturar la quinta muestra, alcanzando en esta el pico más alto. Basado en los resultados anteriores, si se analiza la figura 7B, se aprecia como después de triturar las primeras tres muestras intenta estar estable, aunque haya picos en los instantes después de triturar las muestras descritas. Después de triturar la cuarta muestra y quinta muestra, se ve como la potencia aumenta considerablemente con respecto a todas las muestras anteriores, esto se debe al efecto de acumulación, ya que el voltaje y el ángulo del coseno de desfase van disminuyendo con el tiempo, pero en ese instante la corriente está aumentando de manera considerable.



**Figura 29. Resultados del quinto experimento teniendo en cuenta que las líneas rojas describen los momentos los cuales introdujeron las muestras al molino**

8. Resultados de otros experimentos:

En vacío se toma la velocidad de rotación del motor:

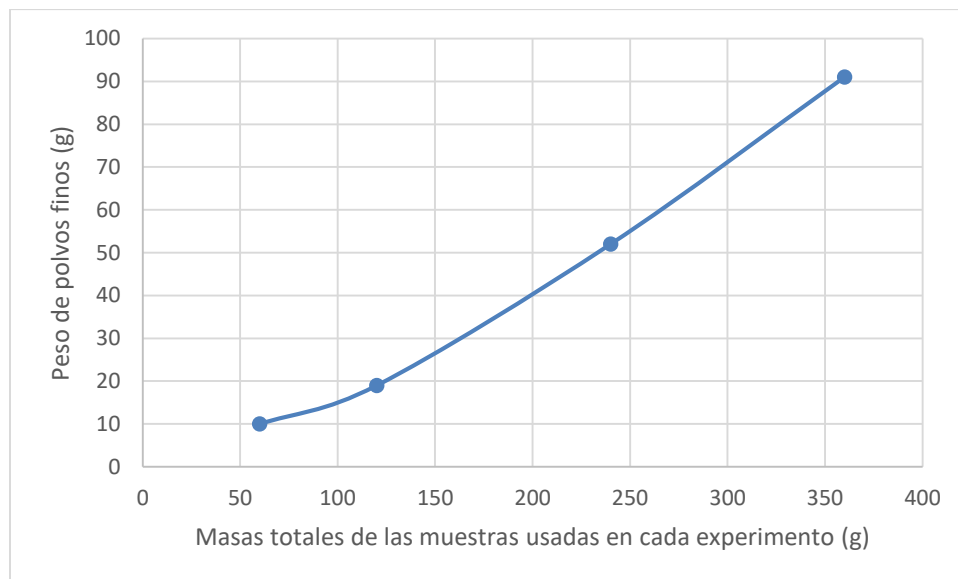
- En el eje de transmisión, es decir, el eje donde están los martillos: 1353 RPM (141,69 Rad/s).
- En el eje del motor: 1793 RPM

Para el cálculo de eficiencia de corte, se midió el peso de polvos finos que se obtuvieron en cada experimento, como está descrito en la tabla 11, usando la ecuación (14) para

obtener el valor de eficiencia de corte, teniendo en cuenta el peso total de todas las muestras usadas en cada experimento.

**Tabla 11. Peso de los polvos finos después de la molienda**

masas individuales (g)	Masas totales por experimento (g)	peso polvos finos por experimento (g)	% eficiencia corte
12	60	10	16,67
24	120	19	15,83
48	240	52	21,67
72	360	91	25,28

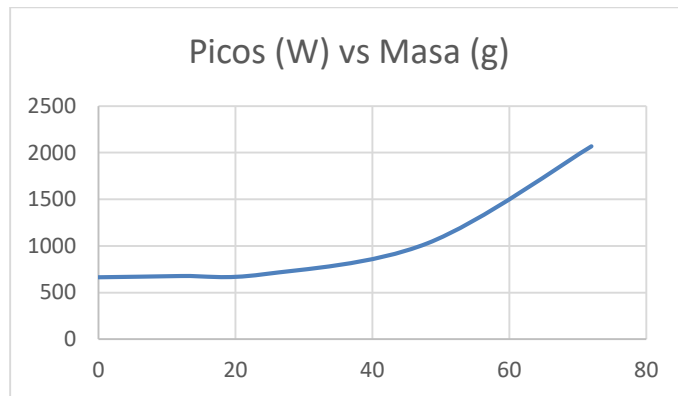


**Figura 30. Relación entre cargas totales contra polvos finos**

### 3.3.4. Discusión

Se tomaron los picos de potencia más altos en cada caso anterior y luego se graficó en relación con las cargas y se obtuvo la gráfica ubicada en la figura 44, la razón por la cual

se eligió el pico más alto es por dos motivos, el primero, es el momento más crítico que sufre el molino en cada experimento, y el segundo, es debido a que a través de este medio son más notables las diferencias entre cada experimento, ya que si se tomara el promedio, en los primeros tres experimentos al tener resultados muy similares, por tal motivo, no sería tan notable las diferencias entre ellos.



**Figura 31. Picos más altos vs masa o carga**

Luego, tomando la figura 31 se obtuvo la ecuación (15), que se encarga de describir su tendencia, como se puede observar, es cuadrática, que además tiene un  $R^2$  de 0,9911, tal como se observa en la ecuación (16), que se encarga de informarnos que la ecuación (15) es demasiada precisa para aplicarse en la realidad para denotar cuál sería la carga en Watts que consumiría el molino según la carga de bagazo de caña que se le introduzca para moler.

$$P = 0,4326m^2 - 12,673m + 11,68 \quad (15)$$

$$R^2 = 0,9911 \quad (16)$$

Donde:

P: Potencia eléctrica que se requiere para moler la carga.

m: Masa o carga de bagazo de caña a moler.

### 3.4. Modelo del molino de martillos funcionando sin carga

Para entender el funcionamiento de la máquina es importante conocer el funcionamiento de la misma sin aplicarle algún tipo de carga, obteniendo un modelo matemático bajo estas condiciones.

Para encontrar el modelo cinemático que mejor se adapta al movimiento que existe en el sistema martillo – tambor, se inicia explicando los modelos existentes de cinemática, los cuales son: El modelo de mecánica de Newton, el de Hamilton, y el de Lagrange.

El primero consiste en relacionar las fuerzas con respecto a la aceleración, que está definido con la derivada de la velocidad con respecto al tiempo, que a la vez es la derivada del desplazamiento con respecto a la misma variable. Tal modelo no se puede implementar en situaciones en donde hay masas muy pequeñas, ni mucho menos en el caso el cual haya velocidades muy altas, tal como lo afirma Beer et al [58].

El modelo de Hamilton consta de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarios de primer orden, el cual la ecuación consta de la suma de energías totales del sistema en función de una constante denominada como Hamiltoniana, denotada con la letra H, el cual además depende de las velocidades y momentos generalizados, tal como lo explica Poznyak [59].

En cambio el modelo de Lagrange, que al igual que el Hamiltoniano, su sistema consta de ecuaciones diferenciales de primer orden, el cual se encarga de denotar una suma de energías totales en función de una constante, que para este caso está definida por una “L”, denominada como Lagrangiano; Pero a diferencia del modelo anterior no depende de momentos, ni velocidades generalizadas, tal como lo describe Poznyak [59]

Basado en la relación que existe entre martillo – tambores y en las restricciones existentes en cada modelo, el que mejor se puede adaptar es el modelo de Lagrange, el cual está descrito en las ecuaciones (17) y (18)

$$L = E_k - W_{ork} \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (18)$$

Dónde:

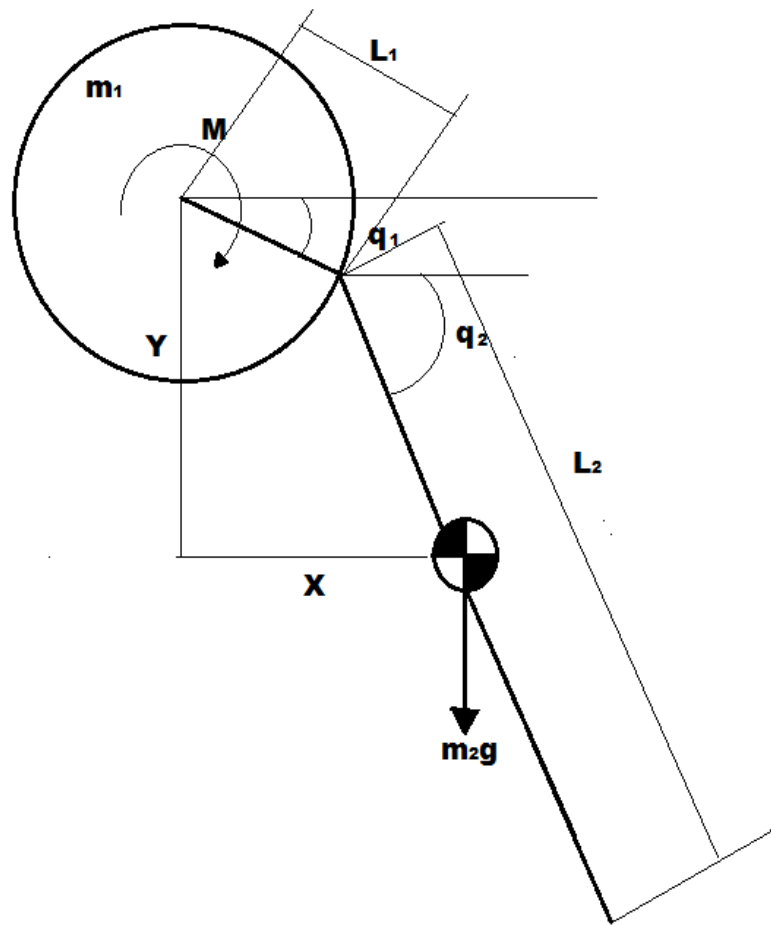
$L$  : Lagrangiano

$E_k$ : Energía cinética total del sistema

$W_{ork}$ : Trabajos que aplica en el sistema

$q_i$ : Desplazamiento general de cada cuerpo que interactúa en el modelo

Para obtener el valor del Lagrangiano, se toma el diagrama dinámico de la figura 32, el cual describe cuál la relación cinemática existente entre el martillo y los tambores mientras está en operación el molino.



**Figura 32. Diagrama de cuerpo dinámico que describe el comportamiento que existe entre el tambor y el martillo**

Donde:

$m_1$ : Masa del tambor.

$m_2$ : Masa del martillo o placa.

$g$ : Aceleración gravitacional que es igual a  $9.81 \frac{m}{s^2}$ .

$L_1$ : Distancia entre el centro del tambor y el martillo, basado en la geometría es igual a:

$$L_1 = 71,9 \text{ mm.} \quad (19)$$

$q_1$ : Es el desplazamiento angular del tambor

$q_2$ : Es el desplazamiento angular del martillo

$L_2$ : Es la longitud del martillo que es igual a 90 mm.

$M$ : Momento angular del tambor que igual al:

$$M = \frac{P}{\dot{q}_1} = \frac{644,9030549 \text{ W}}{141,69 \text{ rad/s}} = 4,551507198 \text{ N} * \text{m} \quad (20)$$

Donde:

$P$ : Potencia del motor.

$\dot{q}_1$ : Velocidad angular del motor.

Hay que tener en cuenta que la circunferencia describe el recorrido de los martillos en el sector el cual está ensamblado con el tambor.

Para obtener el valor de momento de inercia de la ecuación (20) fueron obtenidos de la media de la gráfica ubicada en la figura 32, y del experimento anterior el cual se midió la velocidad angular del eje del molino de martillos y la potencia promedio consumida por el molino cuando opera sin carga.

También para mayor comprensión de la figura 32, se definen matemáticamente las componentes horizontal y vertical del centro de masa del martillo con respecto al centro del tambor, los cuales están descritos en las ecuaciones (21) y (22).

$$X = [L_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot \text{Cos}(q_1)] + \left[ \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \dot{q}_2 \cdot \text{Cos}(q_2) \right] \quad (21)$$

$$Y = -[L_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot \text{Sen}(q_1)] - \left[ \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \dot{q}_2 \cdot \text{Sen}(q_2) \right] \quad (22)$$

Donde:

$X$ : Componente horizontal de la velocidad lineal del martillo medido desde el centro del tambor.

$Y$ : Componente vertical de la velocidad lineal del martillo medido desde el centro del tambor.

$\dot{q}_2$ : Velocidad angular del martillo

Teniendo en cuenta lo anterior, el Lagrangiano quedaría:

$$L = \left[ \frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot \dot{q}_1^2 \right] + \left[ \frac{1}{2} \cdot I_2 \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \right] + \left[ \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (X^2 + Y^2) \right] - [M \cdot q_1] \\ + \left[ m_2 \cdot g \cdot \left[ \{L_1 \cdot \text{Cos}(q_1)\} + \left\{ \frac{L_2}{2} \cdot \text{Cos}(q_2) \right\} - L_1 - \frac{L_2}{2} \right] \right] \quad (23)$$

Aplicando la ecuación (23), teniendo en cuenta que se hace un sistema de ecuaciones para el tambor, el cual está denotado como el cuerpo  $q_1$ , otro para el martillo, definido como  $q_2$ , obteniendo el modelo descrito desde la ecuación (24) hasta la ecuación (29)

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} = [I_1 \cdot \dot{q}_1] + [I_2 \cdot \dot{q}_2 \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)] + [m_2 \cdot (X \cdot [L_1 \cdot \text{Cos}(q_1)] - Y \cdot [L_1 \cdot \text{Sen}(q_1)])] \quad (24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} = [I_2 \cdot \dot{q}_2 \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)] + \left[ m_2 \cdot \left( X \cdot \left[ \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \text{Cos}(q_2) \right] - Y \cdot \left[ \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \text{Sen}(q_2) \right] \right) \right] \quad (25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = [-m_2 \cdot L_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot (X \cdot \text{Sen}(q_1) + Y \cdot \text{Cos}(q_1))] - M - [m_2 \cdot g \cdot L_1 \cdot \text{Sen}(q_1)] \quad (26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = \left[ -m_2 \cdot \left( X \cdot \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \dot{q}_2 \cdot \text{Sen}(q_2) + Y \cdot \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \dot{q}_2 \cdot \text{Cos}(q_2) \right) \right] - \left[ m_2 \cdot g \cdot \frac{L_2}{2} \cdot \text{Sen}(q_2) \right] \quad (27)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) = [I_1 \cdot \ddot{q}_1] + [I_2 \cdot \dot{q}_2 \cdot (\ddot{q}_1)] \quad (28)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) = [I_2 \cdot \ddot{q}_2 \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \ddot{q}_2 \cdot I_2 \cdot \dot{q}_2] \quad (29)$$

El modelo Lagrangiano queda finalmente descrito en las ecuaciones (30) y (31)

$$[I_1 \cdot \ddot{q}_1] + [I_2 \cdot \dot{q}_2 \cdot (\ddot{q}_1)] + [m_2 \cdot L_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot (X \cdot \text{Sen}(q_1) + Y \cdot \text{Cos}(q_1))] + M + [m_2 \cdot g \cdot L_1 \cdot \text{Sen}(q_1)] = 0 \tag{30}$$

$$[I_2 \cdot \ddot{q}_2 \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \ddot{q}_2 \cdot I_2 \cdot \dot{q}_2] + \left[ m_2 \cdot \left( X \cdot \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \dot{q}_2 \cdot \text{Sen}(q_2) - Y \cdot \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \dot{q}_2 \cdot \text{Cos}(q_2) \right) \right] + \left[ m_2 \cdot g \cdot \frac{L_2}{2} \cdot \text{Sen}(q_2) \right] = 0 \tag{31}$$

Donde:

$\ddot{q}_1$ : Aceleración angular del tambor

$\ddot{q}_2$ : Aceleración angular del martillo

Tomando los valores conocidos, los cuales están en la tabla 12, podemos reemplazarlos en las ecuaciones (28) y (29) tomando el ángulo  $q_1$  como una variable independiente y como variables desconocidas  $q_2$  y  $\dot{q}_2$ , dando como resultado la tabla 13.

**Tabla 12. Valores conocidos para la solución de ecuaciones**

Variabes conocidas	Valor	Unidades
$\ddot{q}_1$	0	$\frac{Rad}{s^2}$
$I_1$	0,050139747	$Kg * m^2$
$I_2$	0,000206307	$Kg * m^2$
$\dot{q}_1$	141,69	$\frac{Rad}{s}$
$m_1$	5,04894	Kg
$m_2$	0,25489	Kg
$L_1$	0,0719	m
$L_2$	0,09	m

M	4,551507198	$N * m$
---	-------------	---------

Usando SIMULINK, se hizo el diagrama descrito en la figura 33, donde se llegó a los resultados de los valores desconocidos ( $q_2$ ,  $\dot{q}_2$  y  $\ddot{q}_2$ ), teniendo en cuenta que son dependientes del único valor independiente,  $q_1$ . En las figuras 34, 35 y 36 describen a través de gráficas los resultados de estos valores con respecto al valor anteriormente descrito, los cuáles numéricamente están descritos en la tabla 13.

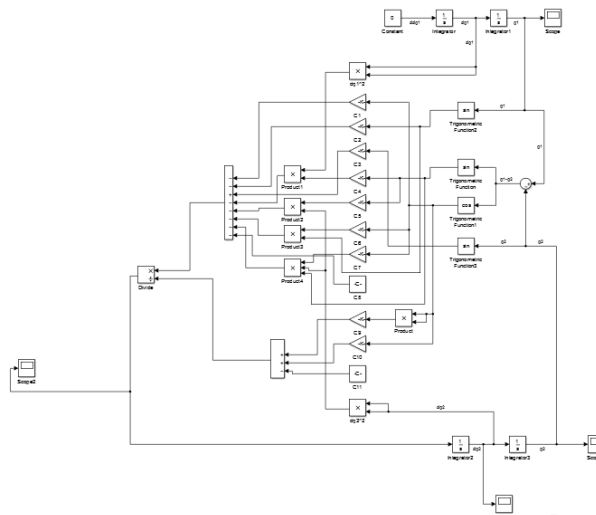


Figura 33 Diagrama de simulink para calcular las ecuaciones

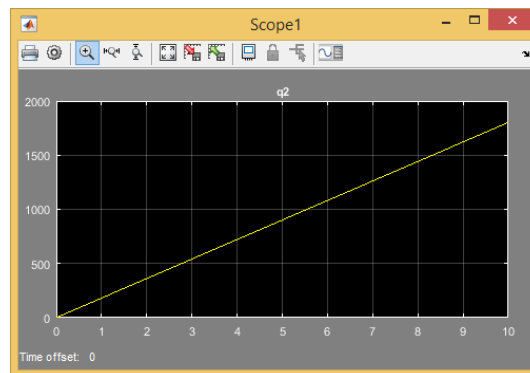
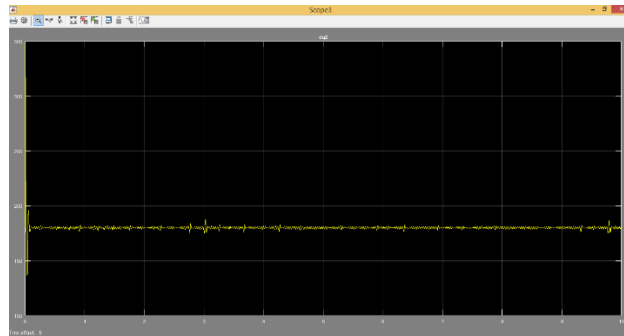
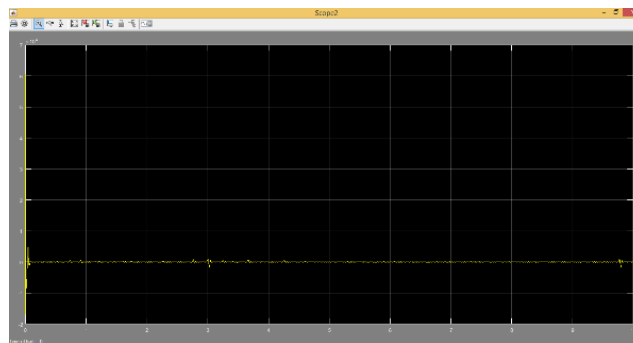


Figura 34. Gráfica  $q_2$  vs t (equivalentemente  $q_2$  vs  $q_1$ )



**Figura 35.  $\dot{q}_2$  vs tiempo ( $\dot{q}_2$  equivalente vs  $q_1$ )**



**Figura 36.  $\ddot{q}_2$  vs tiempo ( $\ddot{q}_2$  equivalente vs  $q_1$ )**

Tabla 13. Valor de las variables desconocidas

Variable	Valor	Unidades
$q_1$	Oscila entre 0 y 360	Grados
$q_2$	Es simultáneo a $q_1$ , por ende, varia entre 0 y 360	Grados
$\dot{q}_2$	141,69	$\frac{Rad}{s}$
$\ddot{q}_2$	0	$\frac{Rad}{s^2}$

La magnitud de la aceleración del martillo ( $\ddot{q}_2$ ) es igual a cero debido a que este cuerpo no tiene ningún cambio de velocidad, ya que conserva el que entrega el motor, razón que también justifica porqué  $\dot{q}_2$  es igual a  $\dot{q}_1$ , ya que al no haber nada que afecte el movimiento del martillo, este gira de manera unánime al tambor, es decir, como si fueran un solo cuerpo. Son resultados que coinciden con lo que se ve cuando el molino está operando sin moler ningún tipo de material.

### 3.5. Modelo del molino de martillos funcionando con carga

Para obtener el modelo matemático del martillo para el caso en el que la máquina esté moliendo caña panelera, ya que fue el único material que trituro el molino de martillos, se debe tener las siguientes variables y modelos:

- El coeficiente de restitución cuando el bagazo colisiona con el martillo.
- Tiempo el cual tarda el impacto entre ambos cuerpos.
- El modelo cinemático del bagazo durante el impacto.
- El modelo Lagrangiano para el caso el cual ocurre el impacto.
- El modelo cinemático del martillo durante el impacto.

### **3.5.1. Experimento para obtener valor número del coeficiente de restitución.**

Para obtener el valor del coeficiente de restitución entre el bagazo de caña de azúcar y el material el cual está fabricado los martillos, los pasos que se siguieron; fueron los siguientes:

- Grabar con un video cámara en posición frontal cómo cae la esfera de metal (una de hierro grande y otro de acero pequeño) sobre un túmulo de bagazo sin humedad, para evitar que esta condición interfiera en los resultados (Teniendo en cuenta que el experimento se repitió varias veces para cada caso).
- Luego después de grabar, el video se reproduce en un programa como camtasia 8.4, con el propósito desfragmentar los vídeos en fotografías para seleccionar las fotos en los momentos exactos en donde inicia los experimentos y cuando alcanza la altura más alta cuando rebota.
- Luego con el programa Paint, teniendo en cuenta como referencia una medida conocida, en este caso fue el del sócalo del fondo de las fotos que mide 88 mm de alto, se toma el sistema de medición del software para medir las longitudes de la foto, para obtener la medida equivalente del valor conocido en esa unidades, obtenido el valor equivalente de 55 pixeles.
- Después se introducen las fotografías seleccionadas en el programa anterior, señalando el pixel en la coordenada vertical el cual inicia el experimento y el pixel el cual las esferas alcanzan el punto más alto de rebote, se realiza una tabla con estos puntos, luego se mide la distancia con respecto al pixel en la misma coordenada que indica la parte superior del túmulo de bagazo de caña, el cual es 375.
- Teniendo los datos anteriores de longitudes y la altura conocida del sócalo en las unidades de milímetros y pixeles, se encuentra la distancia equivalente de cada longitud de la lista anterior en milímetros, para luego aplicar la ecuación (32), y obtener así el valor del coeficiente de restitución de cada experimento. Las tablas 14 y 15 muestran los resultados obtenidos

de realizar los pasos anteriores y este, teniendo en cuenta que se indicó el tiempo en el que sucede los instantes capturados.

- Luego con los resultados en milímetros usando el programa Excel se obtiene la media y la varianza, obteniendo así el resultado final, tal como se ve en las ecuaciones (33) y (34).

**Tabla 14. Datos obtenidos con la esfera de hierro**

tiempo (s)	punto (pixeles)	distancia (pixeles)	distancia (mm)	Coeficiente de restitución
	Y	Y	Y	
61,5	191	184	317,4902	0,4361
62,3	340	35	60,3922	
70,17	176	199	343,3725	0,4808
71,17	329	46	79,3725	
75,1	170	205	353,7255	0,3951
75,4	343	32	55,2157	
79,067	144	231	398,5882	0,4606
79,63	326	49	84,5490	
91,47	131	244	421,0196	0,4527
92,43	325	50	86,2745	
95,7	165	210	362,3529	0,4254
96,13	337	38	65,5686	
98,6	115	260	448,6275	0,4067
99,067	332	43	74,1961	

62,033	139	76	235,8621	0,4443
62,37	200	15	46,5517	
7,83	108	107	332,0690	0,4430
67,23	194	21	65,1724	

**Tabla 15. Datos obtenidos con la esfera de acero.**

tiempo (s)	punto (pixeles)	distancia (pixeles)	distancia (mm)	Coeficiente de restitución
	Y	Y	Y	
107,97	124	251	433,0980	0,3399
108,67	346	29	50,0392	
110,9	132	243	419,2941	0,3572
111,27	344	31	53,4902	
113,3	134	241	415,8431	0,3469
113,67	346	29	50,0392	
115,53	130	245	422,7451	0,3499
115,9	345	30	51,7647	
120,8	109	266	458,9804	0,3186
121,16	348	27	46,5882	
124,97	132	243	419,2941	0,3849
125,33	339	36	62,1176	
127,47	110	265	457,2549	0,3737

127,87	338	37	63,8431	
129,8	109	266	458,9804	0,3004
130,13	351	24	41,4118	
132,9	109	266	458,9804	0,3575
133,27	341	34	58,6667	
136,27	108	267	460,7059	
139,3	351	24	41,4118	0,2998

$$e = \sqrt{\frac{L_0}{L_r}} \quad (32)$$

Donde:

$L_0$ : Distancia desde el punto de inicio de cada experimento hasta el túmulo de bagazo.

$L_r$ : Distancia desde el punto más alto de rebote de las esferas hasta el túmulo de bagazo.

El resultado del coeficiente de restitución de la esfera de hierro ( $e_h$ ) con el bagazo de caña de azúcar es:

$$e_h = 0,438288733 \pm 0,000700495 \quad (33)$$

El coeficiente de restitución del bagazo de caña de azúcar con el acero ( $e_a$ ) es de::

$$e_a = 0,345573911 \pm 0,039069853 \quad (34)$$

(31)

### 3.5.2. Modelo matemático que describe el tiempo el cual ocurre el impacto entre el martillo y el bagazo de caña de azúcar.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la unidad pasada y el material que está hecho los martillos, definido como SAE 1020, cuya densidad es igual a 7870 Kg/m<sup>3</sup> según Peña [60], y un coeficiente de restitución de 0,34557, último dato obtenido de la ecuación (35)

El modelo matemático para obtener el tiempo de impacto está definido en la ecuación (33)

$$e = \frac{R \cdot \Delta t}{P \cdot \Delta t} \leftrightarrow (e * P) - R = 0 \quad (35)$$

Donde:

$R$ . Es la fuerza de restitución el cual ejerce el cuerpo después del impacto.

$P$ : Es la fuerza del impacto entre los dos cuerpos.

$\Delta t$ : Delta de tiempo en el que ocurre el impacto.

Pero para conocer ambas fuerzas se requiere de las ecuaciones (36) y (37).

$$P * \Delta t = m_b * \sqrt{2 * g * L_o} \quad (36)$$

$$R * \Delta t = m_b * \sqrt{2 * g * L_r} \quad (37)$$

Donde:

$L_o$ : Distancia desde el punto de inicio de cada experimento hasta el túbulo de bagazo.

$L_r$ : Distancia desde el punto más alto de rebote de las esferas hasta el túbulo de bagazo.

$m_b$  : Es la masa de la esfera de acero, el cual es igual a 7,25 g, equivalente a 0,00725 Kg.

De los datos obtenidos en el experimento anterior, que están descritos en la tabla 15 y en la ecuación (34) para el caso cuando la relación es acero - bagazo, se resolvió el sistema comprendido por las ecuaciones (35), (36) y (37) en cada experimento, obteniendo como resultado la tabla 16.

**Tabla 16. Valores para cada experimento de impacto**

$P * \Delta t$	$R * \Delta t$	P	$\Delta t$	R
0,0211	0,0072	0,2616	0,0808	0,0889
0,0208	0,0074	0,2574	0,0808	0,0919
0,0207	0,0072	0,2564	0,0808	0,0889
0,0209	0,0073	0,2585	0,0808	0,0904
0,0213	0,0212	0,2642	0,0808	0,2621
0,0218	0,0069	0,2693	0,0808	0,0858
0,0208	0,0080	0,2574	0,0808	0,0991
0,0217	0,0081	0,2688	0,0808	0,1004
0,0218	0,0065	0,2693	0,0808	0,0809

Tomando los resultados de la tabla 16, se llegó que el tiempo de impacto en cada experimento fue el mismo, por tal motivo, el valor obtenido fue de  $\Delta t = 0,0808$  s.

### 3.5.3. Modelo matemático que describe el movimiento del martillo durante el proceso del impacto

Para este modelo hay que tener en cuenta lo siguiente, primero el modelo lagrangiano que describe el movimiento del martillo, el cual está descrito en las ecuaciones (16) y (17) en este caso siguen siendo los mismos, debido a que la relación cinemática entre martillos y tambores se conserva. Para simplificar el modelo hay que considerar que el desplazamiento del bagazo se considerará como una partícula que se desplaza de longitudinalmente. los motivos se deben a que, si

se considera como un cuerpo el bagazo, se debería considerar en ese caso que después del impacto éste se dividirá en una cantidad desconocida de partes, que además cada una tendrá tamaño, longitud y velocidad diferente con respecto a los otros, los cuales luego volverán a impactar con el martillo repitiendo el fenómeno de nuevo, hasta obtener fragmentos de bagazo con un tamaño el cual puede pasar por la criba, algo que sería matemáticamente muy difícil de modelar y que además no nos proporciona información relevante con respecto a los martillos.

Basado en lo anterior, el modelo lagrangiano para este caso es el mismo que para el caso en donde no actúa cargas, obteniendo así las ecuaciones (38) y (39), que son las mismas ecuaciones (30) y (31)

$$[I_1 \cdot \ddot{q}_1] + [I_2 \cdot \dot{q}_2 \cdot (\ddot{q}_1)] + [m_2 \cdot L_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot (X \cdot \text{Sen}(q_1) + Y \cdot \text{Cos}(q_1))] + M \quad (38)$$

$$+ [m_2 \cdot g \cdot L_1 \cdot \text{Sen}(q_1)] = 0$$

$$[I_2 \cdot \ddot{q}_2 \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \ddot{q}_2 \cdot I_2 \cdot \dot{q}_2] \quad (39)$$

$$+ \left[ m_2 \cdot \left( X \cdot \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \dot{q}_2 \cdot \text{Sen}(q_2) - Y \cdot \left( \frac{L_2}{2} \right) \cdot \dot{q}_2 \cdot \text{Cos}(q_2) \right) \right]$$

$$+ \left[ m_2 \cdot g \cdot \frac{L_2}{2} \cdot \text{Sen}(q_2) \right] = 0$$

Teniendo en cuenta la relación cinemática entre martillo – tambor y la consideración del bagazo como partícula, se obtiene la ecuación (40), que describe el comportamiento del martillo, tambor y el bagazo en el momento de impacto, en términos de longitud, velocidad, y el coeficiente de restitución que existe en relación entre el material que está hecho el martillo y el que compone el bagazo.

$$e = \frac{\dot{q}_{3f} - (L_1 + L_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_{2f})}{((L_1 + L_2) * \dot{q}_1) - \dot{q}_{3i}} \quad (40)$$

Donde:

$\dot{q}_{3f}$ : Velocidad longitudinal del bagazo durante del impacto.

$\dot{q}_{2f}$ : Velocidad angular del martillo durante del impacto.

$\dot{q}_{3i}$ : Velocidad longitudinal del bagazo, antes del impacto, que es igual a cero.

$\dot{q}_1$ : Velocidad angular del tambor, que es igual a 141,69 Rad/s.

La ecuación (41), conocida como la definición de aceleración angular aplicada en el martillo, el motivo se debe a que esta pieza pivotea desde un punto ubicado en el agujero donde es atravesado el eje que se ubica en uno de los alrededores de los tambores que, por ser holgado, permite que ocurra el balanceo.

$$\ddot{q}_2 = \frac{\dot{q}_{2f} - \dot{q}_{2i}}{\Delta t} \quad (41)$$

Donde:

$\ddot{q}_2$ : Aceleración angular del martillo promedio.

$\Delta t$ : Tiempo el cual ocurre el impacto, que es igual a 0,0808 segundos. Información obtenida de la tabla 16.

La ecuación (42) es la definición de aceleración traslacional aplicado en el bagazo, esto se debe a las consideraciones dichas anteriormente para simplificar el modelo, es decir, que el bagazo se verá como una partícula y que además se desplaza longitudinalmente. Estas estimaciones se tuvieron también en cuenta para obtener la ecuación (43), que describe la longitud que recorre el bagazo en términos de su velocidad antes del impacto, su aceleración durante el momento que ocurre el choque y el tiempo en qué ocurre tal acción. Estas ecuaciones son obtenidas del modelo cinemático de movimiento rectilíneo.

$$\ddot{q}_3 = \frac{\dot{q}_{3f} - \dot{q}_{3i}}{\Delta t} \quad (42)$$

$$\left( \frac{\ddot{q}_3 * \Delta t^2}{2} \right) + (\dot{q}_{3i} * \Delta t) = q_{3f} \quad (43)$$

Donde:

$\ddot{q}_3$ : Aceleración traslacional promedio del bagazo de caña.

$q_{3f}$ : Longitud recorrida por el bagazo después del impacto.

Para obtener momento de inercia (M) para este caso, es decir, donde hay impacto entre el martillo y el bagazo, se parte de la ecuación (20), pero cambiando el valor que se encuentra allí de potencia por la ecuación (15), pero aplicando como carga el valor más pesado de bagazo usado de manera experimental, es decir, 72 gramos, obteniendo de esta manera la ecuación (44). Hay que tener en cuenta que para aplicar la ecuación (15), la unidad de medición de la carga es en gramos y la potencia obtenida está en Watts.

$$M = \frac{0,4326 * (72)^2 - 12,673 * (72) + 11,68}{141,69} = 9,4701 \text{ N} * \text{m} \quad (44)$$

Teniendo en cuenta el sistema de ecuaciones, que inicia desde la ecuación (38), hasta la (44), se elabora la tabla 17, que describe las de las variables que intervienen en ellas con el propósito de identificar las variables desconocidas, para luego encontrar el valor de cada una de estas.

**Tabla 17. Valores conocidos y desconocidos del modelo matemático.**

VARIABLES CONOCIDAS	Valor	Unidades
$\ddot{q}_1$	0	$\frac{Rad}{s^2}$
$I_1$	0.050139747	$Kg * m^2$
$I_2$	0.000206307	$Kg * m^2$
$\dot{q}_1$	141.69	$\frac{Rad}{s}$
$\dot{q}_{2i}$	141,69	$\frac{Rad}{s}$

$m_1$	5.04894	Kg
$m_2$	0.25489	Kg
$L_1$	0.0719	m
$L_2$	0,09	m
$m_3$	0,072	Kg
$q_2$	Desconocido	Grados
M	9,470127744	N*m
$\dot{q}_{2f}$	Desconocido	$\frac{Rad}{s}$
$\ddot{q}_2$	Desconocido	$\frac{Rad}{s^2}$
$q_3$	Desconocido	m
$\dot{q}_3$	Desconocido	$\frac{m}{s}$
$\ddot{q}_3$	Desconocido	$\frac{m}{s^2}$

Basado en todo lo descrito anteriormente, se obtuvo la lista de resultados de la tabla 18, aplicando el modelo teniendo en cuenta que el martillo puede golpear partículas de bagazo en cualquier posible posición angular que se encuentre el tambor mientras esté girando. El modelo solo se calculó cuando el tambor estaba en entre las posiciones angulares 0° y 64°

**Tabla 18. Resultado numérico de los valores desconocidos para validación del modelo**

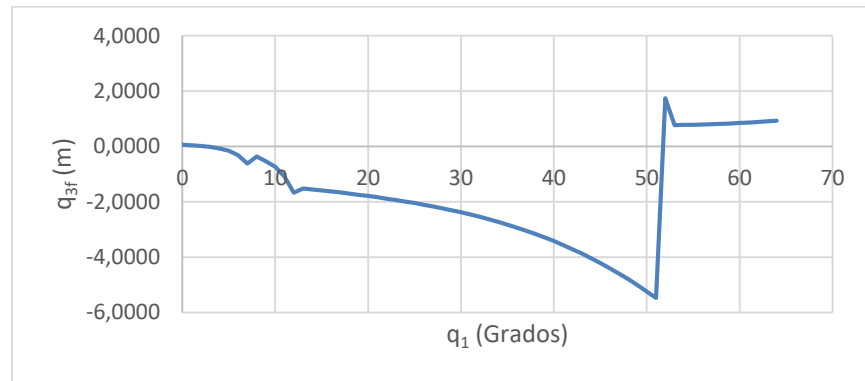
$q_1$ (Grados)	$q_2$ (Grados)	$\dot{q}_{2f}$ (Rad/s)	$\ddot{q}_2$ (Rad/s <sup>2</sup> )	$q_{3f}$ (m)	$\dot{q}_{3f}$ (m/s)	$\ddot{q}_3$ (m/s <sup>2</sup> )
0	338,0083	-181,1608	-3995,6785	0,0621	1,5370	19,0223
1	340,4681	-183,6348	-4026,2967	0,0459	1,1365	14,0653
2	343,0357	-187,2824	-4071,4401	0,0221	0,5459	6,7565
3	345,6974	-192,7118	-4138,6357	-0,0135	-0,3331	-4,1224
4	348,4298	-201,0215	-4241,4794	-0,0678	-1,6784	-20,7728
5	351,1937	-214,4149	-4407,2388	-0,1554	-3,8468	-47,6093

6	353,9187	-237,9586	-4698,6218	-0,3094	-7,6586	-94,7842
7	356,4522	-285,3178	-5284,7506	-0,6192	-15,3260	-189,6784
8	352,4813	-245,4825	-4791,7393	-0,3586	-8,8767	-109,8599
9	354,2647	-271,7068	-5116,2966	-0,5301	-13,1224	-162,4057
10	355,4595	-301,5313	-5485,4122	-0,7252	-17,9510	-222,1655
11	356,9365	-357,1189	-6173,3778	-1,0888	-26,9506	-333,5472
12	358,1172	-446,0393	-7273,8771	-1,6704	-41,3468	-511,7180
13	182,2702	-422,2144	-6979,0149	-1,5146	-37,4896	-463,9798
14	182,3720	-427,5259	-7044,7506	-1,5493	-38,3495	-474,6224
15	182,4670	-433,0121	-7112,6496	-1,5852	-39,2377	-485,6153
16	182,5550	-438,6955	-7182,9882	-1,6224	-40,1579	-497,0031
17	182,6358	-444,5990	-7256,0519	-1,6610	-41,1136	-508,8321
18	182,7093	-450,7466	-7332,1366	-1,7012	-42,1089	-521,1502
19	182,7753	-457,1633	-7411,5503	-1,7432	-43,1478	-534,0073
20	182,8337	-463,8749	-7494,6147	-1,7871	-44,2344	-547,4554
21	182,8843	-470,9086	-7581,6663	-1,8331	-45,3732	-561,5491
22	182,9269	-478,2931	-7673,0585	-1,8814	-46,5687	-576,3455
23	182,9615	-486,0583	-7769,1621	-1,9322	-47,8259	-591,9047
24	182,9880	-494,2357	-7870,3673	-1,9857	-49,1498	-608,2898
25	183,0062	-502,8584	-7977,0839	-2,0421	-50,5458	-625,5672
26	183,0162	-511,9612	-8089,7429	-2,1016	-52,0196	-643,8067
27	183,0180	-521,5808	-8208,7966	-2,1645	-53,5770	-663,0815
28	183,0117	-531,7553	-8334,7195	-2,2311	-55,2242	-683,4684
29	182,9973	-542,5250	-8468,0079	-2,3015	-56,9679	-705,0478
30	182,9750	-553,9318	-8609,1801	-2,3761	-58,8146	-727,9036
31	182,9450	-566,0191	-8758,7757	-2,4552	-60,7715	-752,1231
32	182,9076	-578,8322	-8917,3545	-2,5390	-62,8460	-777,7970
33	182,8631	-592,4180	-9085,4956	-2,6278	-65,0455	-805,0190
34	182,8119	-606,8247	-9263,7955	-2,7221	-67,3780	-833,8858
35	182,7545	-622,1016	-9452,8663	-2,8220	-69,8513	-864,4964

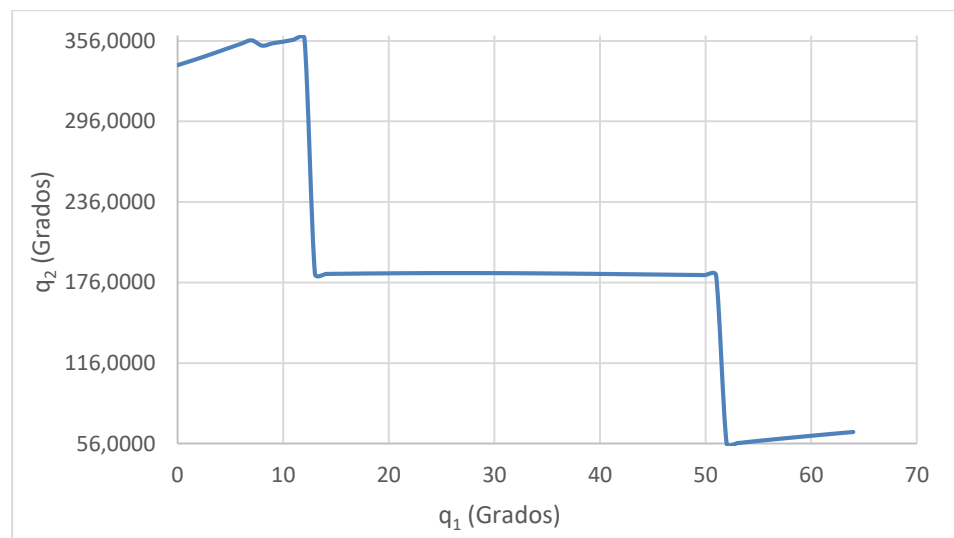
36	182,6913	-638,2993	-9653,3332	-2,9279	-72,4737	-896,9520
37	182,6228	-655,4693	-9865,8323	-3,0402	-75,2535	-931,3556
38	182,5497	-673,6634	-10091,0080	-3,1592	-78,1992	-967,8115
39	182,4725	-692,9344	-10329,5100	-3,2853	-81,3191	-1006,4250
40	182,3919	-713,3349	-10581,9918	-3,4187	-84,6220	-1047,3018
41	182,3085	-734,9179	-10849,1073	-3,5599	-88,1163	-1090,5478
42	182,2230	-757,7360	-11131,5096	-3,7091	-91,8105	-1136,2687
43	182,1359	-781,8418	-11429,8495	-3,8668	-95,7133	-1184,5700
44	182,0479	-807,2878	-11744,7744	-4,0333	-99,8329	-1235,5563
45	181,9595	-834,1258	-12076,9277	-4,2088	-104,1780	-1289,3319
46	181,8713	-862,4075	-12426,9498	-4,3938	-108,7568	-1346,0005
47	181,7838	-892,1846	-12795,4780	-4,5885	-113,5777	-1405,6652
48	181,6975	-923,5084	-13183,1488	-4,7934	-118,6491	-1468,4291
49	181,6127	-956,4304	-13590,5994	-5,0088	-123,9791	-1534,3954
50	181,5298	-991,0024	-14018,4703	-5,2349	-129,5763	-1603,6677
51	181,4491	-1027,2766	-14467,4082	-5,4721	-135,4491	-1676,3507
52	55,5037	-73,6095	-2664,5983	0,7656	18,9496	234,5245
53	56,3318	-72,6280	-2652,4505	0,7720	19,1085	236,4912
54	57,1459	-71,5069	-2638,5752	0,7793	19,2900	238,7376
55	57,9464	-70,2345	-2622,8275	0,7876	19,4960	241,2872
56	58,7337	-68,7964	-2605,0297	0,7970	19,7288	244,1687
57	59,5081	-67,1750	-2584,9633	0,8076	19,9913	247,4171
58	60,2701	-65,3486	-2562,3585	0,8196	20,2870	251,0769
59	61,0200	-63,2897	-2536,8772	0,8331	20,6203	255,2023
60	61,7580	-60,9637	-2508,0900	0,8483	20,9969	259,8629
61	62,4845	-58,3256	-2475,4405	0,8655	21,4241	265,1492
62	63,1997	-55,3156	-2438,1885	0,8852	21,9113	271,1800
63	63,9040	-51,8511	-2395,3112	0,9079	22,4722	278,1218
64	64,5978	-47,8125	-2345,3281	0,9343	23,1261	286,2141

Para analizar la tabla 18, se graficó las figuras 37 y 38, las donde se describen el recorrido del bagazo y del martillo con respecto al recorrido del tambor, teniendo en cuenta que el martillo y el tambor se desplaza rotacionalmente y el bagazo, por las consideraciones anteriores, de manera traslacional. Los resultados obtenidos fueron caóticos, es decir, que no se puede aproximar a una forma matemática conocida; esto se debe a que el ángulo con el que impacta el martillo con el bagazo es una variable independiente con la posición angular que se encuentre el tambor, al igual que las posiciones que se encuentre el bagazo después del impacto, ya que puede desplazarse a cualquier longitud y dirección independientemente la posición que se encontraba el tambor cuando ocurrió el impacto. Para los valores de magnitud del bagazo es importante considerar que no se tiene en cuenta ni la resistencia del aire, ya que este puede afectar la magnitud y dirección del bagazo, ni la existencia de la carcasa, ya que este es un límite que no sólo no permite que el bagazo siga, sino que además puede hacer que este rebote, cambiando así la magnitud y dirección con la que se estaba desplazando la misma. También se observa en la misma tabla 18 que la velocidad del martillo después del impacto cambió tanto en magnitud como en dirección.

Si alguno de los resultados obtenidos anteriormente no se hubiera dado, significaría que habría un error en la selección del modelo, lo que conlleva a buscar otro sistema de ecuaciones que mejor se adecúe al fenómeno físico descrito allí.



**Figura 37. Posición longitudinal del bagazo después del impacto con respecto a la posición angular del tambor**



**Figura 38. Angulo del martillo después del impacto con respecto a la posición angular del tambor**

## **4. Capítulo 4: Proceso de optimización del martillo**

### **4.1. Introducción**

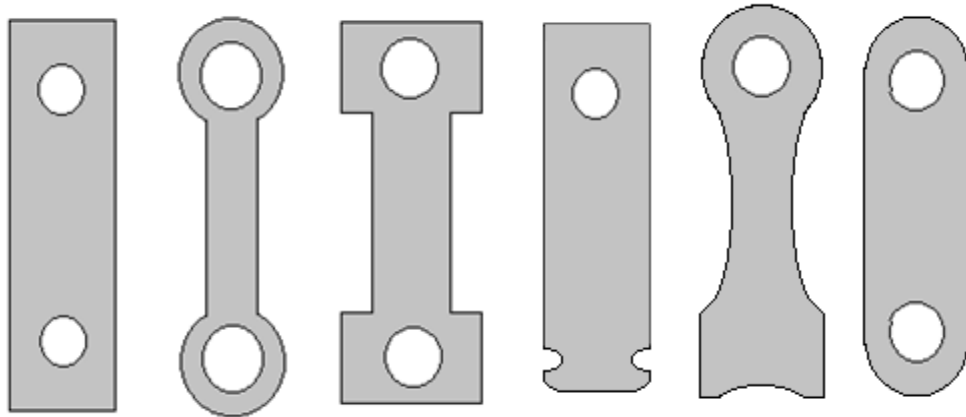
El proceso de optimización en este caso busca maximizar la función que define la fuerza de impacto en el martillo, variando la geometría del martillo, ya que, al obtener mayores fuerzas de impacto, se obtendría menor consumo de potencial eléctrico; pero para ello se requiere de una serie de restricciones, que se obtuvieron a través de varios factores, como los materiales que intervienen en el proceso, en la geometría de la carcasa que cubre los martillos, entre otros. Para este proceso es importante tener un punto de partida que se llegó no sólo con el propósito de obtener una geometría diferente de lo que conoce actualmente en la industria, sino también con la intención de que se garantice de que se obtenga una mayor fuerza de impacto cuando esté en contacto con el bagazo caña panelera. Cuando se finalice el proceso anterior, se someterá los martillos óptimos a los mismos experimentos que se hicieron con los convencionales, Luego se comparará los resultados en ambos tipos de martillos con el fin de demostrar que el martillo óptimo consume menor potencia eléctrica que los convencionales, además de que puede producir mayor cantidad de polvos finos.

### **4.2. Proceso de optimización**

El propósito de este proceso es proponer una geometría diferente a las que exista en el mercado que además garantice maximizar la fuerza de impacto, ya que entre mayor sea esta magnitud, menor sería el consumo de potencial necesario que requeriría la máquina para cumplir con su función.

Para ello es importante conocer las geometrías que existen en el mercado de martillos para molino, las cuales se pueden apreciar en la figura 39, aunque son diversos, todos ellos poseen eficiencias de corte similares. Hay que tener en cuenta que en los martillos que poseen agujero en la parte inferior también se pueden encontrar sin éste, la razón por

la cual tiene este orificio es para que cuando haya desgaste por impacto en las esquinas inferiores del martillo, se pueda quitar la pieza para colocarla de nuevo de manera invertida, con el fin de ahorrar gastos en repuestos.



**Figura 39. Geometrías de martillos para molino que se encuentran en el momento en la industria**

La propuesta geometría de martillo se debe hacer con la intención de que tenga mayor inercia en la región donde hay impacto, para garantizar que habrá incremento de fuerza en la acción, y que además no se encuentre actualmente en la industria, razón por la cual se optó por la figura 41. Hay que tener en cuenta que para llegar a esa geometría se tomó como punto de partida la figura 40, la cual describe la forma de los martillos que tenía el molino de martillos usado en los experimentos de la unidad 3.3., cuyas magnitudes de longitud se encuentran En la tabla 19.

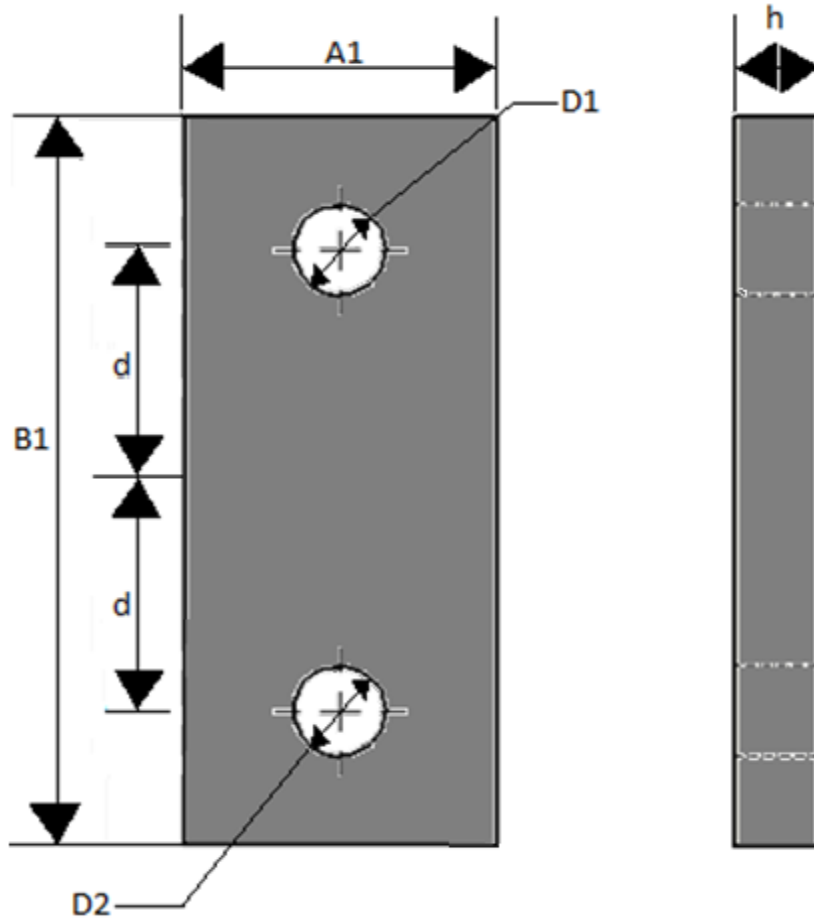
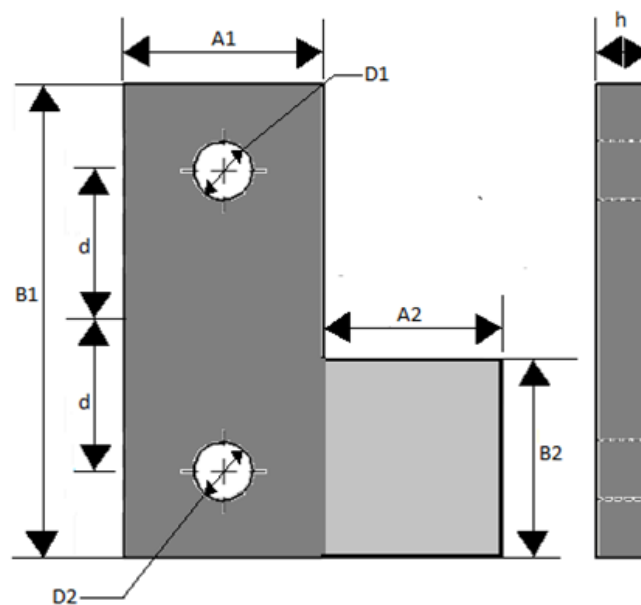


Figura 40. Geometría del martillo sin optimizar

Tabla 19. Dimensiones de la geometría del martillo sin optimizar usados en los experimentos

Longitud	Medidas (mm)
A1	38
B1	90
D1	16
D2	16
d	28,5
h	10



**Figura 41. Propuesta de geometría de martillo óptimo**

Tomando como referencia la figura 41 y la geometría de la carcasa del molino de martillos usado en los experimentos de la unidad 3.3., ya que para validación de resultados se usará el mismo molino de martillos, sólo se le cambiará los martillos por lo óptimos, por tal motivo se busca evitar fallas por roce o impacto entre el martillo con las paredes de la carcasa y la criba del molino; Por tales motivos se llegó a las restricciones descritas desde las ecuaciones (45) hasta la (51), teniendo que las unidades descritas en esas ecuaciones están dadas en milímetros.

$$8 \leq A1 \leq 50 \quad (45)$$

$$0 \leq A2 \leq 50 \quad (46)$$

$$0 < H1 \leq 90 \quad (47)$$

$$0 \leq H2 \leq 90 \quad (48)$$

$$0 \leq D2 \leq 16 \quad (49)$$

$$5 \leq h \leq 15 \quad (50)$$

$$20 < d \leq 28,5 \quad (51)$$

Luego se obtiene la ecuación 52, que describe la fuerza de impacto entre el martillo y el bagazo.

$$F_i = \frac{1}{2} * m_2 * \left( (\dot{q}_{2f} + \dot{q}_1) * (L_1 + L_2) \right)^2 \quad (52)$$

Donde:

$F_i$ : Fuerza de impacto.

$m_2$ : Masa del martillo

$\dot{q}_{2f}$ : Velocidad angular del martillo durante el impacto

$\dot{q}_1$ : Velocidad angular del tambor

$L_1$ : Distancia entre el centro del tambor y el martillo.

$L_2$ : Longitud del martillo.

Finalmente, se obtiene la forma canónica de la optimización, la cual está descrita en la tabla 20, que tiene como función describir que función cumple las ecuaciones anteriores en el proceso de optimización.

**Tabla 20. Forma canónica de la optimización**

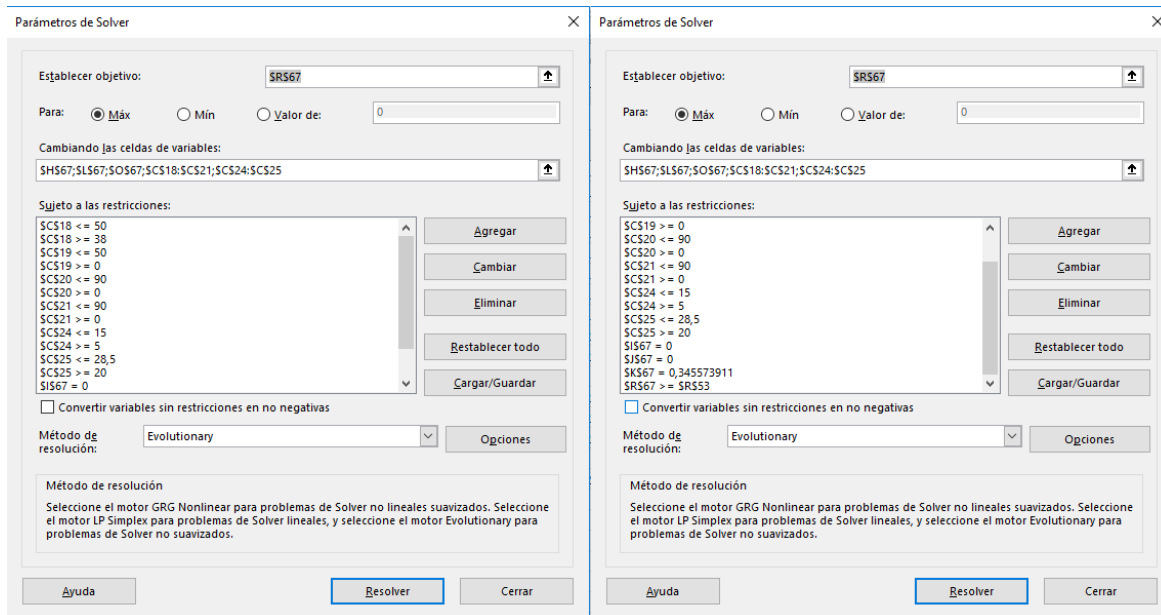
		Número que denota las ecuaciones
Función objetivo:	Maximizar:	(52)
Restricciones	Restricciones obtenidas por el modelo de Lagrange	(38)
		(39)
	Restricción de material (Relación entre acero y bagazo)	(34)
		(40)
	Restricciones obtenidas por el movimiento cinemático del bagazo y el martillo	(41)
		(42)
(43)		

	Restricciones geométricas del martillo	(45)
		(46)
		(47)
		(48)
		(49)
		(50)
		(51)

Luego, en el programa Excel, usando la hoja donde se obtuvo los resultados de la tabla 18, se selecciona el punto donde la fuerza de impacto es más crítica ( $q_1=51^\circ$ ), se introduce los datos señalados en la tabla 20 en una función denominada “solver”, en la opción “evolutivo”, obteniendo como resultado los valores de la tabla 22. La figura 42 muestra de manera fotográfica lo descrito anteriormente.

**Tabla 21. Dimensiones del martillo optimizado**

Longitud	Medida (mm)
A1	49,84
A2	15,56
B1	76,90
B2	24,28
D1	16
D2	0,00
h	15,00
d	28,50



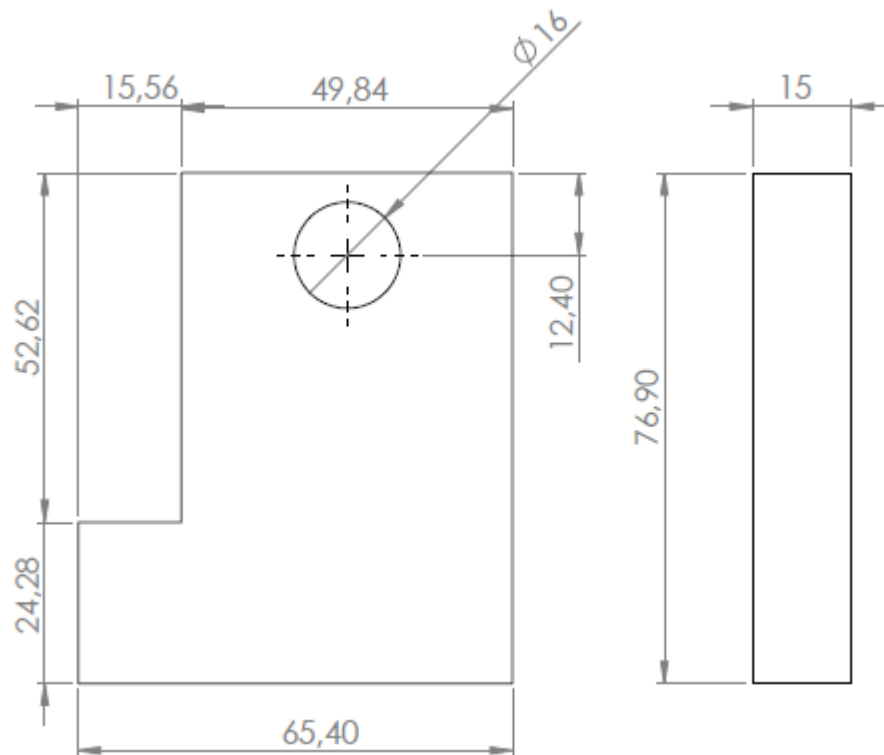
**Figura 42. Pantallazos del solver usado en el programa Excel**

Para verificar matemática que el resultado es correcto, se toma el mismo punto crítico ( $q_1=51^\circ$ ), pero cambiando los valores geométricos del molino por los óptimos, se compara los resultados, y si con el martillo óptimo se obtiene un valor de fuerza de impacto mayor, significa que el resultado puede ser el correcto. La razón por la cual no se afirma aún con certeza que lo es, es porque se necesita verificarse experimentalmente para validar los resultados. Si matemáticamente no se obtiene el resultado esperado, significa que el proceso de optimización o el modelo de ecuaciones es errado. La tabla 23 muestra esta comparación, donde se muestra que la fuerza de impacto aplicando los martillos óptimos es aproximadamente 3,15 veces mayor con respecto al aplicado por los martillos convencionales. La figura 43 son los planos finales del martillo óptimo, en donde se observa la geometría de la figura 41 con las magnitudes de longitud de la tabla 22.

**Tabla 22. Resultado de los martillos aplicando el modelo matemático**

Tipo de molino	$q_2$ (Grados)	$\dot{q}_{2f}$ (Rad/s)	$\ddot{q}_2$ (Rad/s <sup>2</sup> )	$q_{3f}$ (m)	$\dot{q}_{3f}$ (m/s)	$\ddot{q}_3$ (m/s <sup>2</sup> )	$F_i$ (N)
Normal	181,4491	-1027,2766	-14467,4082	-5,4721	-135,4491	-1676,3507	2619,8628
Óptimo	180,3619	-1713,1347	-22955,7511	-9,9582	-246,4896	-3050,6134	8249,2544

Figura 43. Planos del martillo optimizado



### 4.3. Validación experimental de la funcionalidad del martillo

Para saber si los martillos con geometría óptima cumplen con su propósito de reducir el consumo de potencia o no, pasarán por un proceso de experimentación similar al que se hizo en el capítulo 3.3., es decir, en cada experimento los martillos serán sometidos a impacto con varias muestras de bagazo con el mismo peso, cada muestra introducida a la máquina durante un periodo de tiempo, tal como lo describe la tabla 24. Teniendo en cuenta que la máquina después de cada experimento se le hará limpieza para evitar que hay muestras de experimentos anteriores que pueda alterar los resultados. En cada experimento se medirá el amperaje, voltaje y el coseno del ángulo de desfase usando el mismo montaje descrito en la figura 24, ya que se los martillos óptimos se usarán en el mismo molino del experimento de la unidad 3.3. Para la medición de la potencia también se aplicó en este caso la ecuación (13).

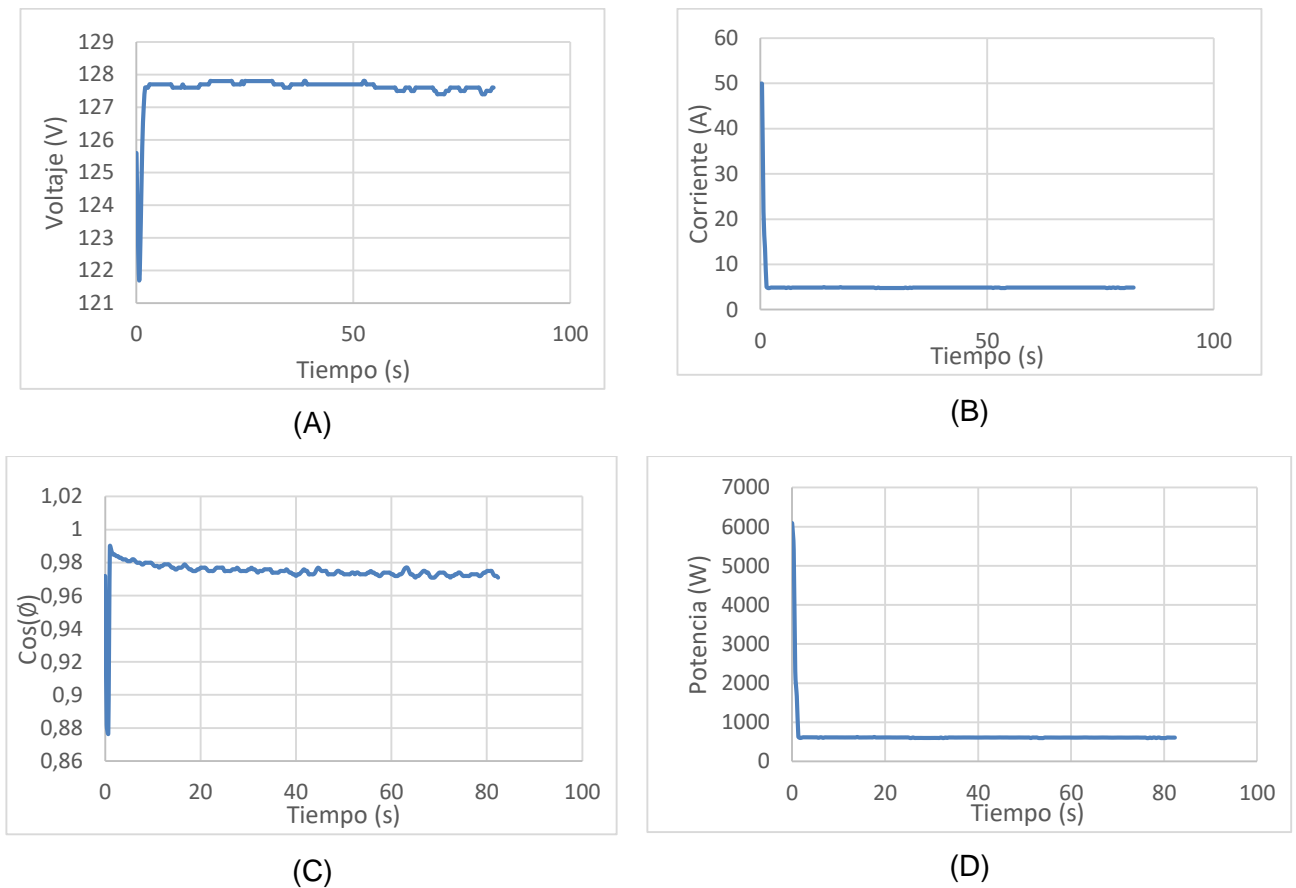
Tabla 23. Procedimiento del experimento.

# del experimento	Peso de la carga (g)	# de muestras	Tiempo que se introduce las cargas mientras opera el molino de martillos
1	0	N.A.	N.A.
2	12	5	60 segundos entre muestras
3	24		
4	48		
5	60		
6	72		
7	84		

Al igual que en los experimentos con los martillos convencionales, se mide el peso de los polvos finos después de cada experimento, los cuales salen del molino y caen en la bolsa adherida a la máquina.

Ahora bien, basado en los resultados obtenidos en cada experimento, se llegó a los siguientes resultados:

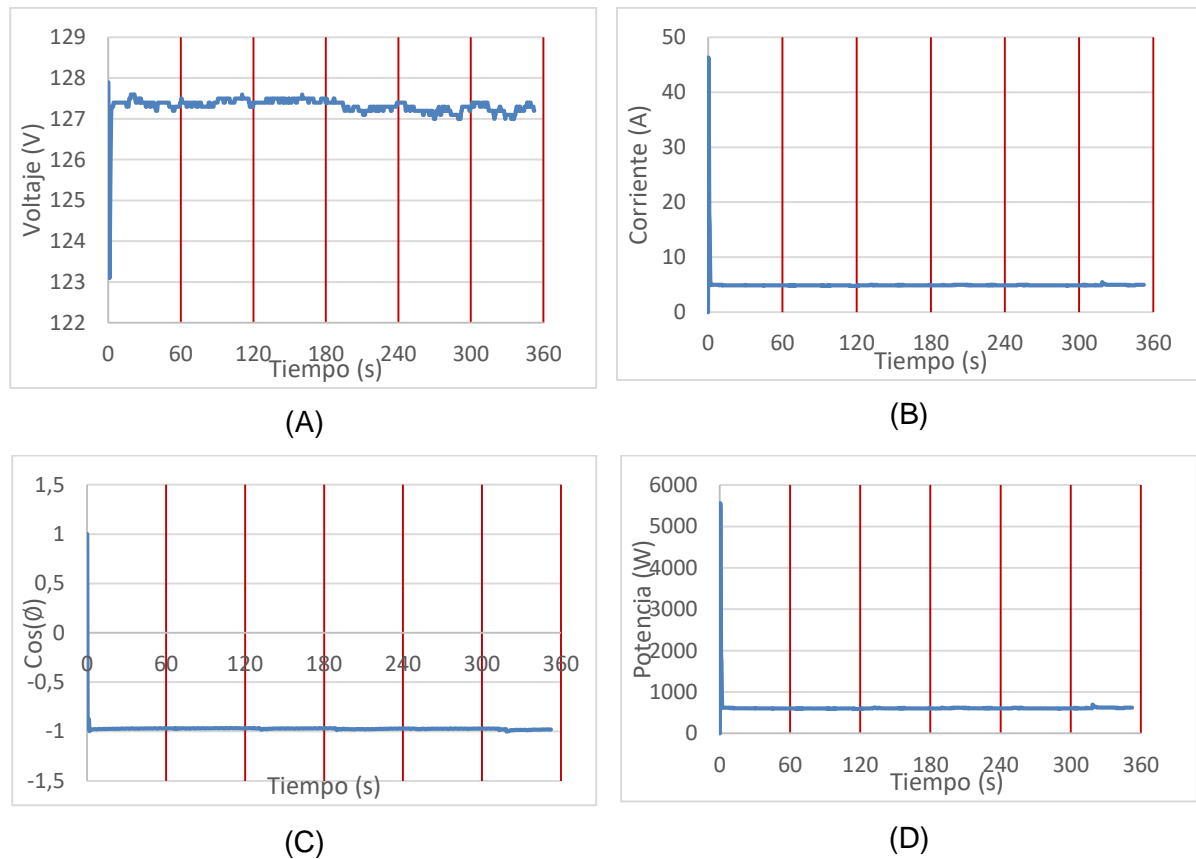
- Experimento 1: Operando el molino de martillos sin carga alguna durante un periodo de tiempo de un minuto con veintidós segundos aproximadamente, en la figura 44 A se puede observar cuanto midió el voltaje durante ese periodo de tiempo, figura 44 B son los de la corriente con respecto al mismo periodo tiempo, figura 44 C se midió el coseno de ángulo de desfase en el mismo periodo de tiempo, y las mediciones de potencia eléctrica con respecto al mismo periodo de tiempo está en la figura 44 D. Al analizar las gráficas Ignorando el momento de arranque, se puede observar que las variables son constantes en todo el momento, aunque hay unas ondulaciones en las figuras 44 A y D, pero como esas variaciones son muy pequeñas en el eje y, se pueden considerar constantes en todo momento.



**Figura 44. Resultados del primer experimento usando martillos óptimos**

- Experimento 2: Introducir cinco muestras de 12 g de bagazo de caña mientras el molino funciona con una separación de 60 segundos entre muestras. En la figura 45 se aprecia las mediciones de Voltaje (A), la corriente o amperaje (B) el coseno del ángulo de desfase (C) y el consumo de potencia (D), cada una de estas variando con respecto al periodo de tiempo que duró este experimento. Basado en los resultados, despreciando el momento de arranque, y describiendo que las líneas rojas que señalan los momentos que fueron arrojadas las muestras, se puede ver que son muy similares al caso anterior, con la diferencia que el coseno del ángulo dio sus resultados negativos, pero en cuanto a magnitud, el resultado es muy similar al caso anterior, razón por la cual se llega a la

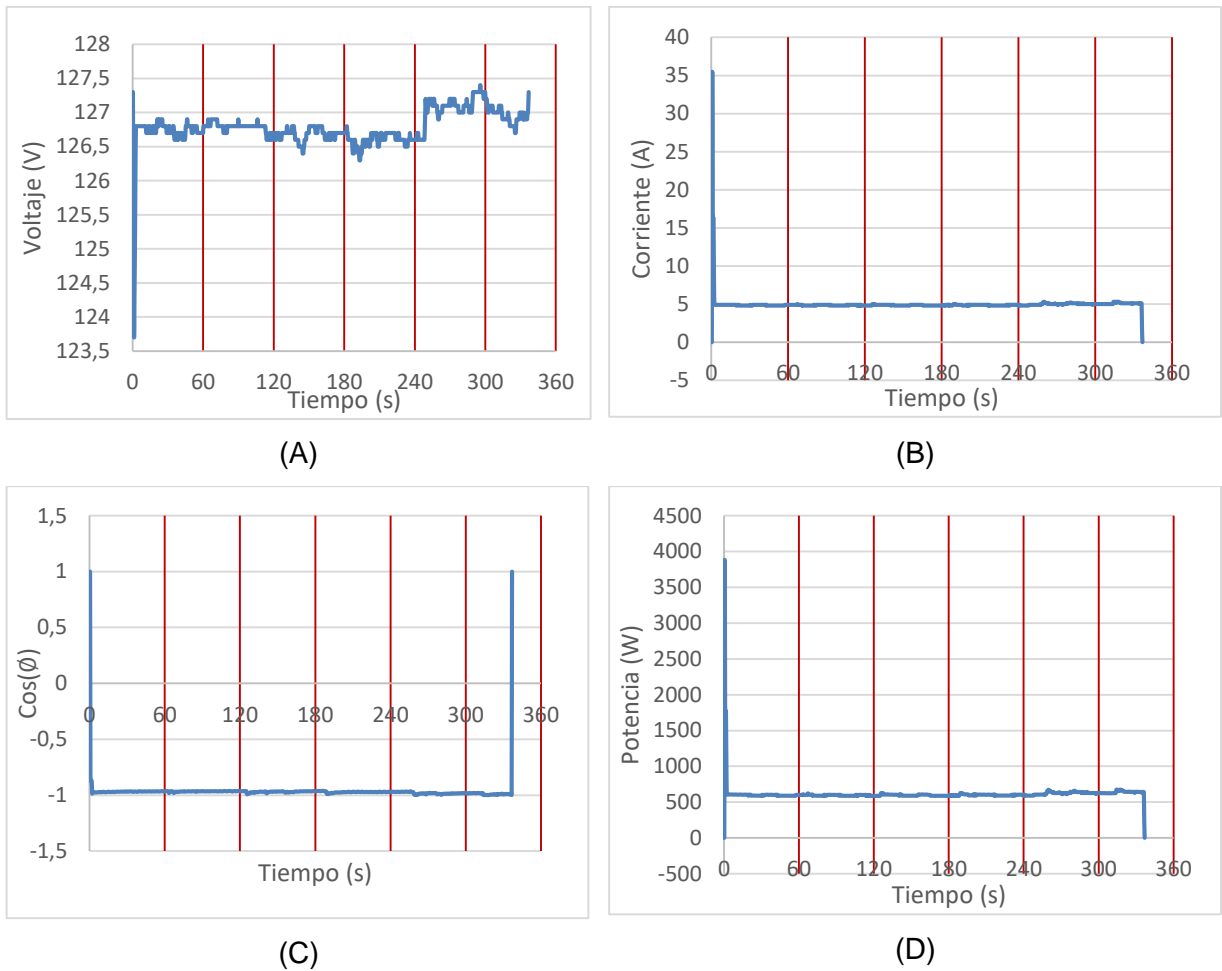
conclusión que el comportamiento del molino es muy similar cuando muele las cinco cargas de 12 gramos que cuando trabaja sin carga.



**Figura 45. Resultados del segundo experimento**

- Experimento 3: Introducir cinco muestras de 24 g de bagazo de caña mientras el molino funciona con una separación de 60 segundos entre muestras. En la figura 46 se aprecia como varía el voltaje (A), Corriente (B), Coseno del ángulo de desfase (C) y la potencia consumida (D) en el transcurso del tiempo que se hacía el experimento, resaltando en las gráficas con líneas rojas verticales los momentos en los cuales se arrojaron las muestras en el molino para ser triturados. Despreciando el momento de arranque y de apagado de la máquina en el último instante, lo que se observa de diferente con

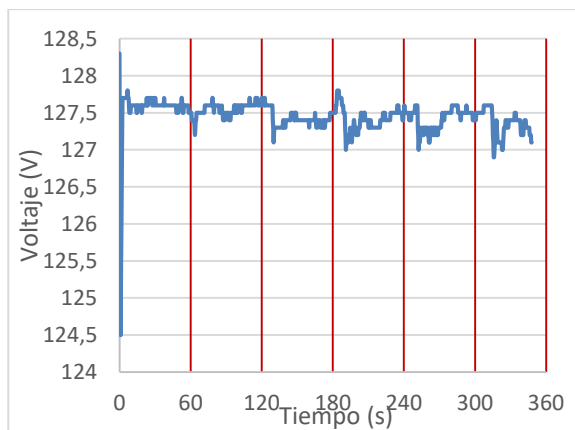
respecto a los experimentos anteriores es que se aprecia un pequeño aumento en el voltaje, lo que significa que el eje de transmisión pudo haber aumentado un poco la velocidad de giro en ese instante; pero de resto es similar al comportamiento cuando no tiene carga.



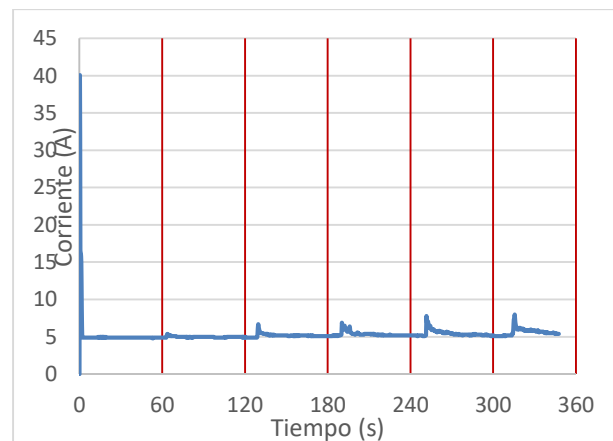
**Figura 46. Resultados del tercer experimento**

- Experimento 4: Introducir cinco muestras de 48 g de bagazo de caña mientras el molino funciona con una separación de 60 segundos entre muestras. En la figura 47 se observa como varía el voltaje (A), Corriente (B), Coseno del ángulo de desfase (C) y la potencia consumida (D) con respecto al tiempo, indicando con líneas rojas los momentos en los cuales se introdujeron las muestras de bagazo. Despreciando el momento de arranque, se puede ver como en los cuatro gráficos,

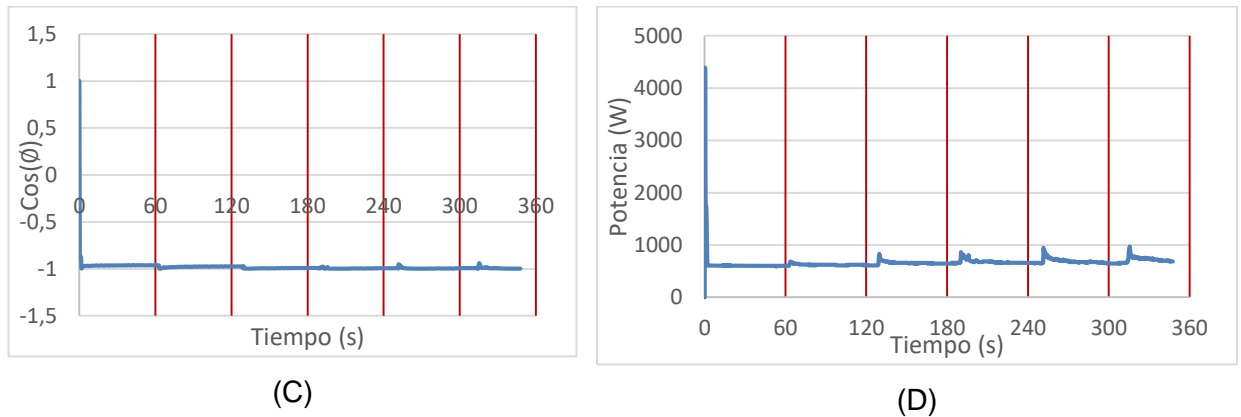
ya se observa el efecto de las cargas en las mediciones, en las figuras 47 (B) y(D) hay un incremento en los valores en los instantes después de que se introdujeron las muestras a moler, estos duran poco porque al poco tiempo vuelven a recuperar la estabilidad, en la figura 47 (A), ya se empieza apreciar a aumento en el voltaje un poco más sobresaliente con respecto a los anteriores, que en los anteriores varían entre valores mayores y menores a 127 V, en cambio en esta figura los intervalos varían teniendo como punto medio 127,5 V, aunque después cada vez que se introducía una muestra en la máquina el voltaje tiende a bajar hasta 127 V, lo que significa que en esos instantes el eje de transmisión redujo su velocidad de giro, aunque después de introducir la tercera muestra, antes de reducir el voltaje a 127 V, tuvo un pico inmediato de aumento, que significa que en ese instante un aumento en la velocidad de giro en el eje principal. En la figura 47 (C) trata de estar estable, aunque se logra ver unos picos muy pequeños, casi imperceptibles en los instantes en los cuales introducen las muestras a moler.



(A)



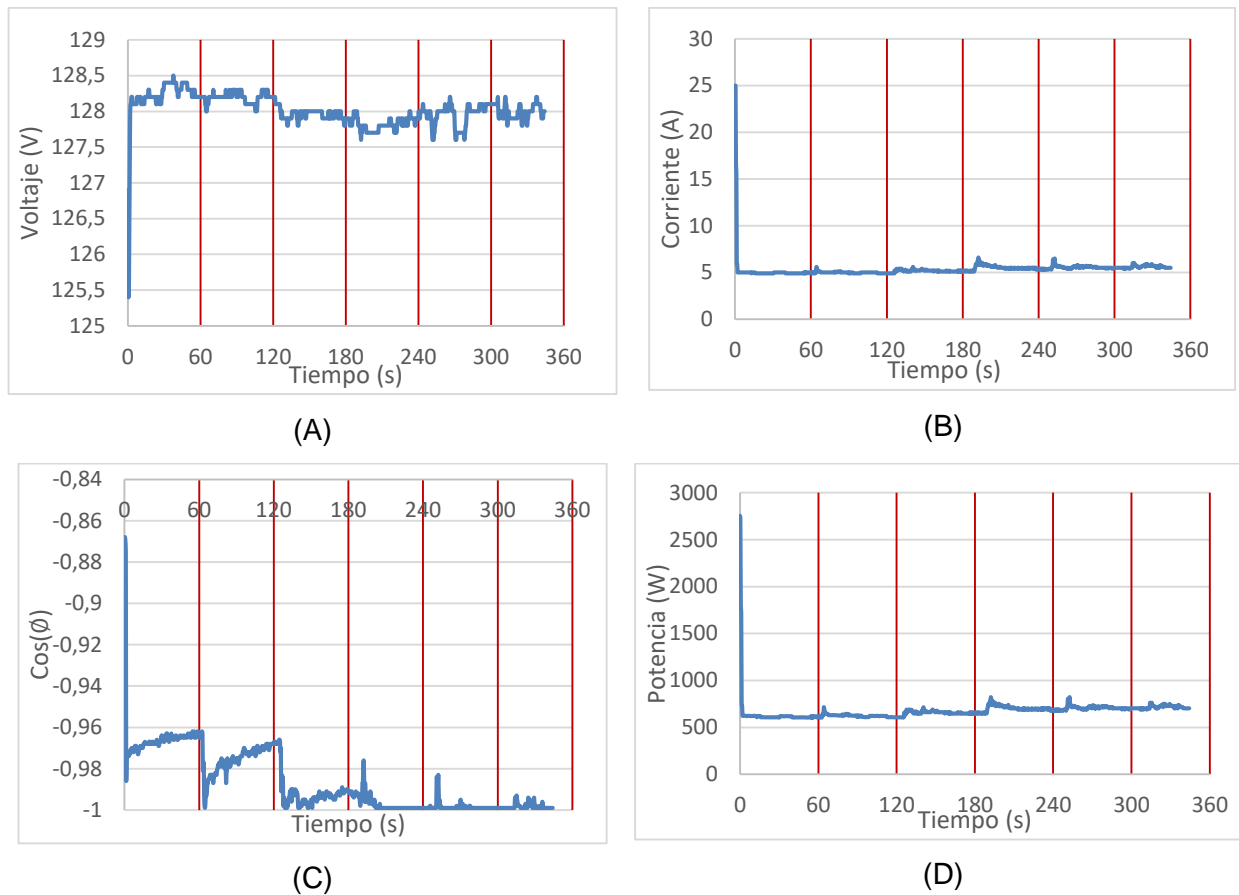
(B)



**Figura 47. Resultados del cuarto experimento**

- Experimento 5: Introducir cinco muestras de 60 g de bagazo de caña mientras el molino funciona con una separación de 60 segundos entre muestras. En la figura 48 se observa como varía el voltaje (A), Corriente (B), Coseno del ángulo de desfase (C) y la potencia consumida (D) con respecto al tiempo, indicando con líneas rojas los momentos en los cuales se introdujeron las muestras de bagazo. En los resultados en general se ve pequeños cambios, es decir, en la figura 48 (A) se ve que como el voltaje varía de tal manera que el punto medio es 128 V, en (B) y (D) se puede ver que los picos de incremento después de introducir el material a moler son un poco mayores con respecto a las figuras anteriores, incluso el potencial después de introducirse la tercera muestra se observa un pequeño incremento en la potencia general, esto ocurre debido a que se empieza a mostrar un poco de acumulamiento, es decir, que cuando se introduce cada muestra, no se muele toda esta, por tal motivo, cuando se introduce la siguiente muestra, la máquina muele la nueva muestras más residuos que quedan de las muestras anteriores. En cuanto a la figura 48 (C) se observa con claridad como estas cargas de 60 gramos empiezan a sobresalir más con respecto a los experimentos anteriores, pero sólo al inicio del experimento porque muestra sobresaltos sobresalientes, pero después de la tercera muestra la máquina trata de estabilizarse en esa variable, lo que implica que el desfase entre voltaje y corriente se hace un poco mayor al inicio del experimento por el cambio de carga, pero aún así, el desfase poco a poco va reduciendo hasta alcanzar la estabilidad de nuevo,

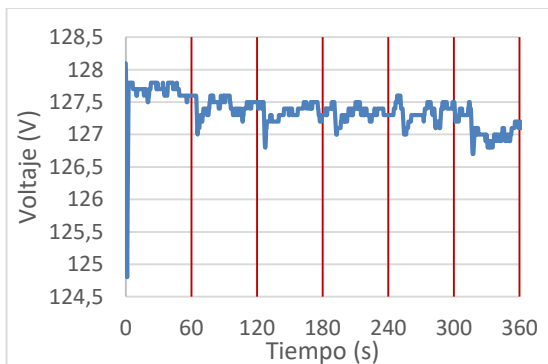
aunque sobresalga un poco picos en instantes después de introducir las tercera, cuarta y quinta muestra.



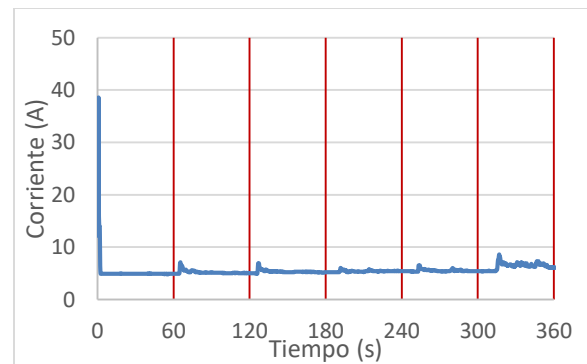
**Figura 48. Resultados del quinto experimento**

- Experimento 6: Introducir cinco muestras de 72 g de bagazo de caña mientras el molino funciona con una separación de 60 segundos entre muestras. En la figura 49 se observa como varía el voltaje (A), Corriente (B), Coseno del ángulo de desfase (C) y la potencia consumida (D) con respecto al tiempo, indicando con líneas rojas los momentos en los cuales se introdujeron las muestras de bagazo. Analizando los resultados se observa en la figura 49 (A) en el voltaje hay una reducción paulatina durante el transcurso del tiempo con unos instantes con picos altos, se podría ocurrir porque el efecto de acumulamiento de material no molido

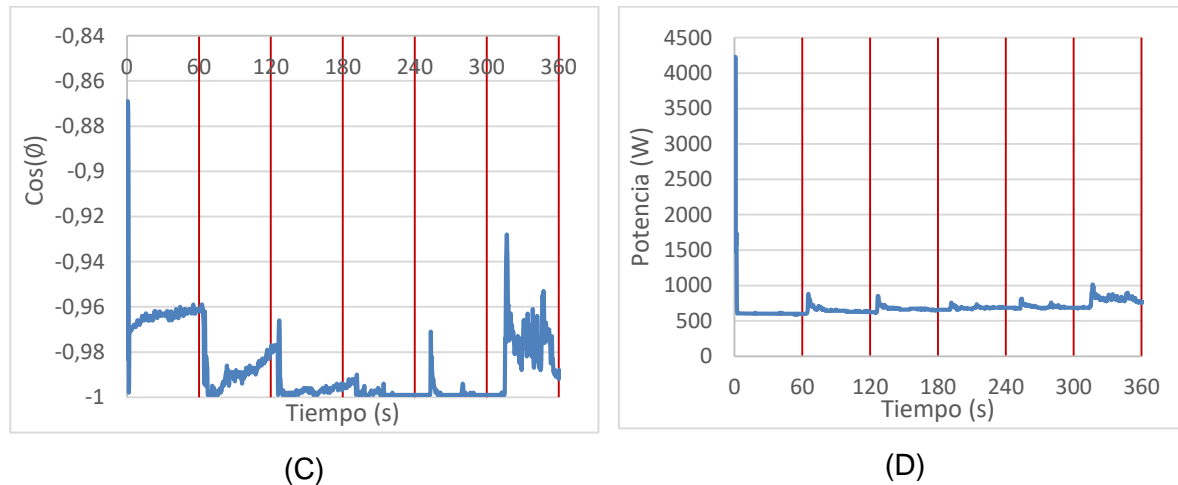
dentro del molino podría afectar en la velocidad de giro del eje de transmisión y esto se reflejó en el voltaje. En el caso de la de 49 (C), el ángulo de desfase si presenta muchos cambios después del momento de arranque hasta después de arrojar la segunda muestra a moler en la máquina, lo que indica que la máquina inicia con un desfase, esto puede ocurrir porque la máquina a estado sometida a muchos cambios de carga durante los experimentos, aunque si sobresale los picos después de que se arrojan las muestras, y el desfase es mucho mayor después de que se arroja la quinta muestra, que incluso persiste hasta el final. En la corriente, como se observa en la figura 49 (B) y (D), sólo se observa pequeños picos momentos después de que se arrojan las muestras, pero no muestra incrementos altos, incluso después de la quinta muestra es donde más incremento hay en la corriente que continúa hasta finalizar, pero muy poco a comparación con el resto de las respectivas gráficas. Es importante resaltar que este experimento no hubo ningún tipo de sobre esfuerzo de la máquina producto de acumulamiento, caso que si pasó cuando se hizo este mismo experimento con los martillos convencionales, razón por la cual al poco tiempo después de introducir la quinta muestra se tuvo que apagar la máquina para evitar fallas porque se estaba sobrecalentando por sobre acumulamiento de material que la máquina ya no era capaz de moler. Incluso en el caso mencionado anteriormente se extendió el tiempo para introducir la cuarta muestra de bagazo para que se pudiera reducir el material que no pasa por la criba para evitar problemas por acumulamiento de material y aún así se presentó el conveniente explicado anteriormente.



(A)



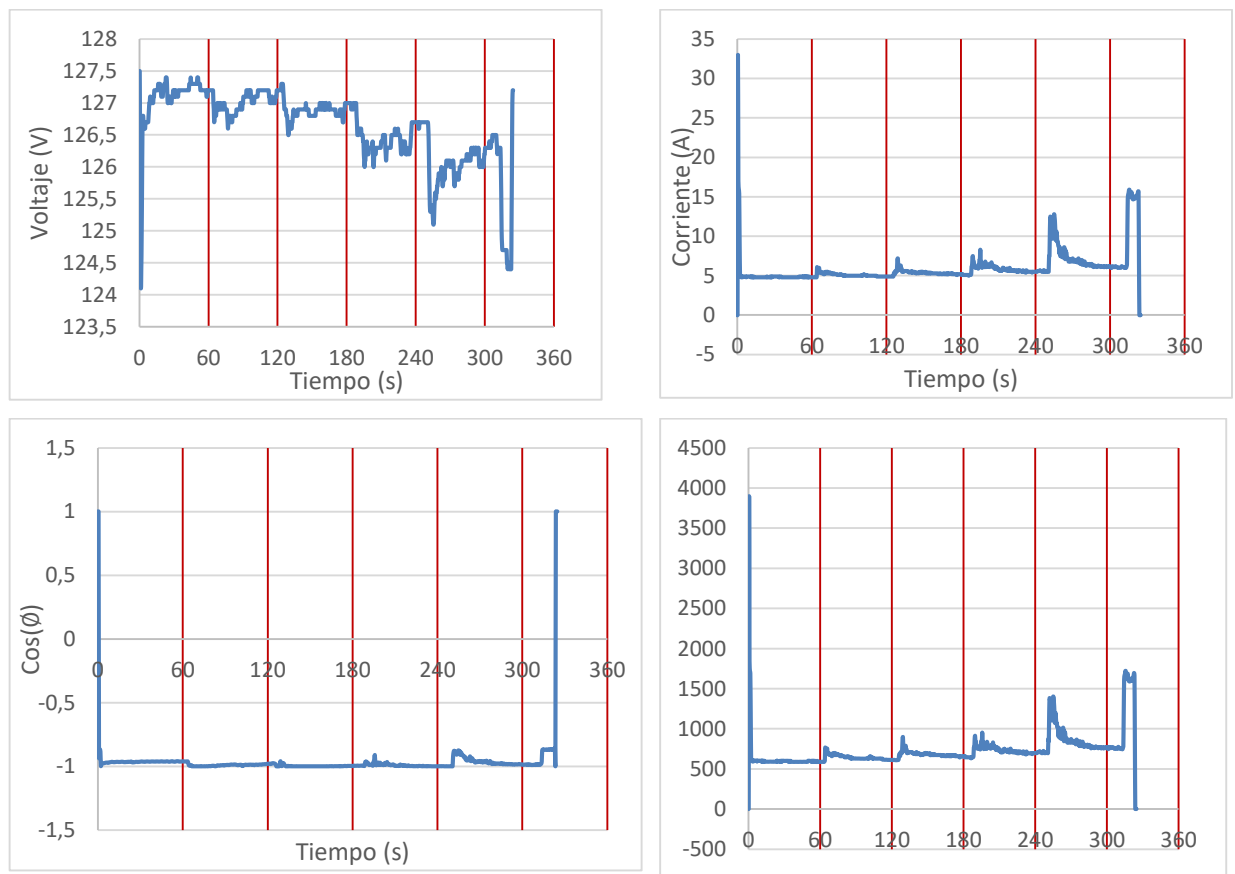
(B)



**Figura 49. Resultados del sexto experimento**

- Experimento 6: Introducir cinco muestras de 84 g de bagazo de caña mientras el molino funciona con una separación de 60 segundos entre muestras. En la figura 50 se observa como varía el voltaje (A), Corriente (B), Coseno del ángulo de desfase (C) y la potencia consumida (D) con respecto al tiempo, indicando con líneas rojas los momentos en los cuales se introdujeron las muestras de bagazo. Este experimento debido a que como la máquina trabajó sin ningún tipo de problema en el experimento, entonces se hizo el riesgo de hacerlo con estas cargas para conocer su comportamiento, lo interesante es que tampoco mostró problemas en este caso, aunque después de introducir la quinta muestra si se vio un comportamiento similar en la máquina que cuando se introdujo la tercera muestra de 72 gramos cuando se hizo el experimento con los martillos convencionales. Sin tener en cuenta el momento de arranque ni el de apagado en las cuatro gráficas de la figura, en la 50 (A) se observa que el voltaje varía entre 127,5 V hasta 124,5, mostrando una reducción del voltaje paulatino durante el transcurso del tiempo cada vez que se introducía una muestra, esto pudo ocurrir por el efecto de acumulamiento de material no molido dentro del molino, ya que este efecto pudo afectar en la velocidad de giro del eje de transmisión y esto se reflejó en el voltaje. Con el ángulo de desfase en la figura 50 (B), se observa sólo pequeños cambios en los instantes que se introduce las muestras, pero de resto trata de estar estable, mostrando así que con estas cargas los desfases entre el voltaje y la corriente

fueron muy pequeños, casi despreciables, esto pudo haber ocurrido en parte porque la limpieza cuando se finalizó el sexto experimento se demoró un poco más y se tuvo que esperar un poco que se enfriara la máquina, porque aunque no hubo inconvenientes en el experimento pasado, si estaba caliente el interior del molino. En cuanto a las figuras 50 (B) y (D) se aprecia como van aumentando la corriente y el consumo de potencia de manera paulatina cada vez que se le introducía una muestra al molino, con picos sobresalientes instantes de después de cada uno de esos instantes, esto se debe al efecto de acumulamiento de material no molido descrito en experimentos anteriores, por tal motivo el consumo aumentó considerablemente después de introducir la quinta muestra.

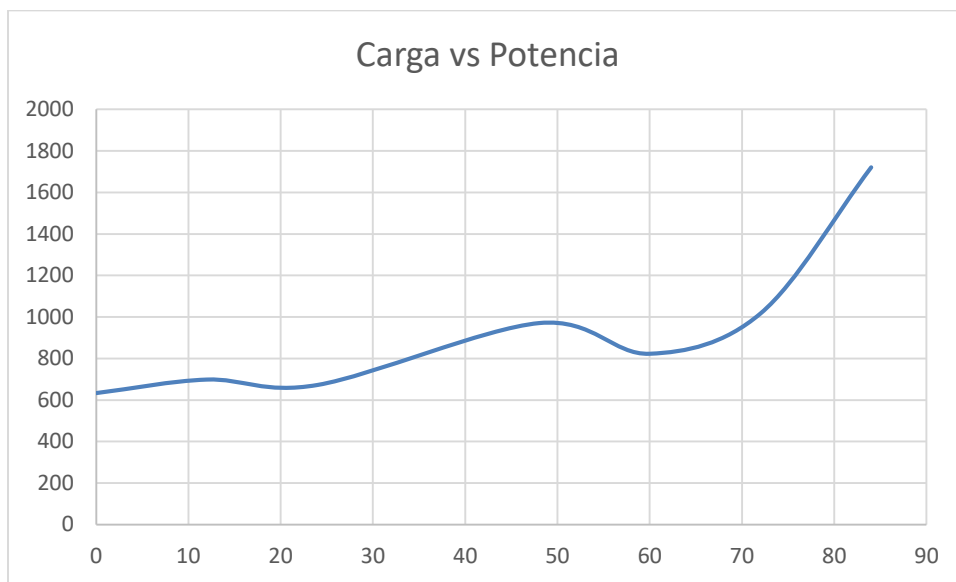


**Figura 50. Resultados del séptimo experimento**

Teniendo los resultados anteriores, se toma picos más altos de las gráficas de potencia de cada carga, se hace una gráfica con estos resultados, obteniendo así la figura 51, y con

ella la ecuación que describe tendencia de la misma con su  $R^2$ , el cual indica cuál es la precisión de la misma, las cuales se pueden ver en las ecuaciones (53) y (54).

**Figura 51. Pesos en gramos por muestra de cada experimento vs consumo de potencia más alto por experimento**



$$P = 0,0063 * m^3 - 0,5811 * m^2 + 16,947 * m + 597,79 \quad (53)$$

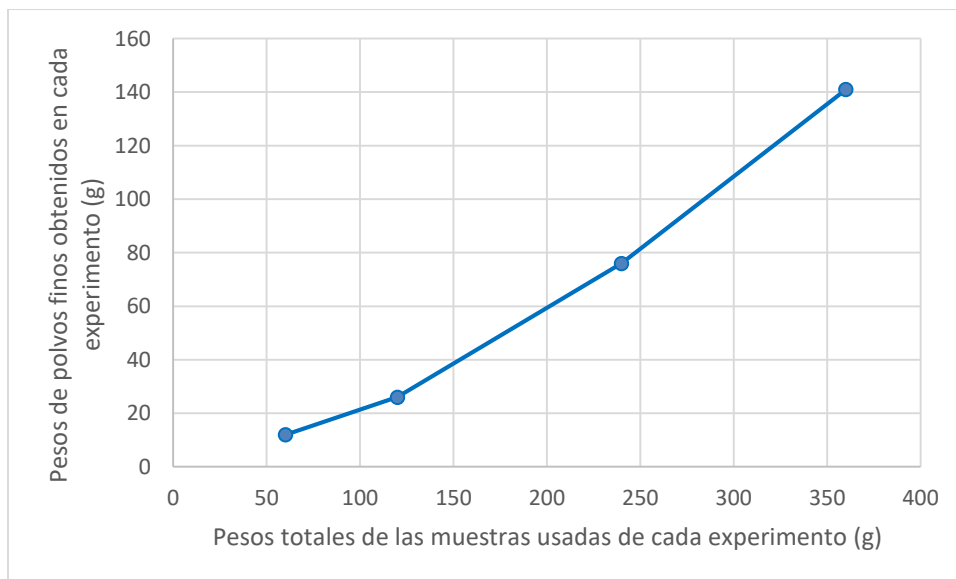
$$R^2 = 0,9092 \quad (54)$$

Para estudiar la eficiencia de corte de los martillos óptimos, se pesó los polvos finos de cada experimento, luego aplicó la ecuación (14) teniendo en cuenta también el peso total de todas las muestras molidas por experimento. La figura 52 se hizo tomando los datos obtenidos de la tabla 25, lo que se puede ver en ella es como es la relación entre polvos finos y pesos totales de las muestras usadas en cada experimento, lo que se puede concluir de esta gráfica es que entre mayor sea la cantidad de carga que se introduce en el molino, mayor es la cantidad de polvos finos que se puede obtener de la molienda. No se tuvo en cuenta el peso de los polvos finos de los experimentos quinto y séptimo porque

cuando se usaron martillos convencionales no se hicieron experimentos con este tipo de cargas, y la intención es comparar los datos de la tabla 25 con la 11 en la próxima unidad.

**Tabla 24. Resultados de pesar las cargas de polvos finos en cada experimento**

<b>Peso muestras individuales (g)</b>	<b>Peso total de las muestras usadas en cada experimento (g)</b>	<b>peso polvos finos (g)</b>	<b>% eficiencia producción de polvos finos</b>
12	60	12	20
24	120	26	21,67
48	240	76	31,67
72	360	141	39,167



**Figura 52. Comparación entre polvos finos y pesos totales de muestras usadas en cada experimento**

## 4.2. Comparación de martillos

Basado en los resultados de los experimentos hechos en las unidades 3.3. y 4.1., se hizo un comparativo de resultados tomando los picos más altos de cada uno, inicialmente se compara los picos más altos en cada experimento en los dos casos, luego se aplica la ecuación estadística (55) para evaluar en porcentaje cuanto redujo la potencia con los martillos óptimos.

$$\left(\frac{PMO-PMSO}{PMSO}\right) * 100\% \quad (45)$$

Donde:

*PMO*: Pico más alto de potencia usando martillos optimizados

*PMSO*: Pico más alto de potencia usando martillos sin optimizar

**Tabla 25. Tabla comparativa de picos más altos con respecto a las cargas molidas**

Peso de cada muestra de los experimentos (g)	Pico más alto optimizado (W)	Picos sin optimizar (W)	% de reducción en potencia consumida
0	633,24	664,07	-4,64
12	698,35	677,52	-3,07
24	672,43	695,26	-3,28
48	970,53	1026,84	-5,48
72	1016,62	2068,69	-50,86

Lo que se observa en la tabla 26 como los picos de potencia van en aumento cuando incrementa la carga, además se aprecia como el porcentaje de reducción de potencia consumida también va aumentando con respecto a la carga, a excepción en el caso donde no hay carga, que la reducción de potencia consumida de aproximadamente 5%, el cual es más alto que en los casos donde las cargas fueron de 12 y 24 gramos. En el caso de 72 gramos se llegó a una reducción de 51%, lo que se concluye con esto que la reducción

de consumo de potencia es muy considerable cuando se usa martillos óptimos para molienda de cargas muy pesadas.

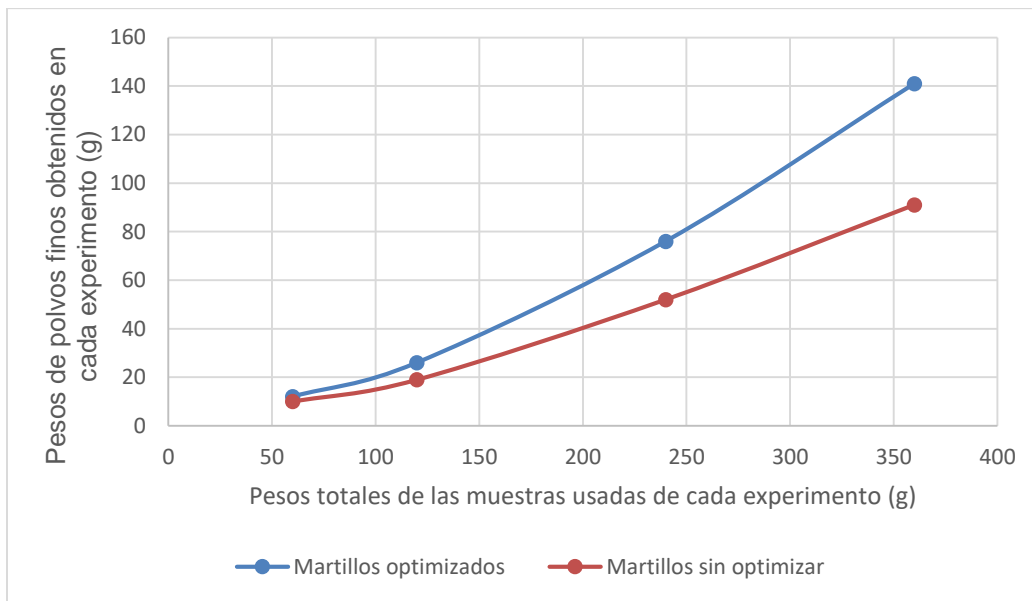
Otra comparación que se hace es la descrita en la figura 53 y la tabla 27, en donde se visualiza algo que ya se dijo anteriormente, que entre mayor son las cargas, mayor cantidad de polvos finos que se obtiene, además se llega a otra conclusión, que con los martillos óptimos se obtiene mayor cantidad de polvos finos que usando los convencionales, se debe a que, al haber mayor impacto entre los martillos y el bagazo, éste se fragmenta en más partes, y por ende, se obtiene tamaños más pequeños de esta biomasa en cada impacto, llegando a conseguir una mayor cantidad de polvos finos, reduciendo en consecuencia, el porcentaje de material que no puede pasar por la criba. De hecho experimentalmente se visualizó algo con relación a esto, en el caso de 72 gramos, con los martillos tradicionales, para que el experimento se efectuara sin problemas se demoró el tiempo en introducir la cuarta muestra para evitar fallas en la máquina, y aun así la máquina después de la quinta muestra presentaba problemas por saturamiento de material, porque el motor se estaba sobrecalentando, la máquina estaba vibrando de más, razón por la cual se apagó al poco tiempo después de introducir la quinta muestra, esto se debía porque había mucho material a moler por acumulamiento de material no molido de las muestras arrojadas anteriormente, en cambio, con los martillos óptimos, el molino funcionó sin que ocurriera este tipo de problemas, incluso cuando se hizo el experimento donde se arrojó cinco muestras de 84 gramos tampoco mostró problemas, el motivo es porque al producir mayor cantidad de polvos finos, la cantidad de material que no podía cruzar la criba era tan poca que no era lo suficiente para generar sobrecalentamiento en el motor. Para obtener las eficiencias de corte se usó la ecuación (14), para obtener la diferencia porcentual de obtención de polvos finos se aplicó la ecuación (46). Aplicando la ecuación (55) se concluyó que para el caso donde las muestras pesaban 72 gramos, con el martillo óptimo se obtiene casi un 55% de mayor cantidad de polvos que usando martillos convencionales.

$$\left(\frac{PPFO-PPFSO}{PPFSO}\right) * 100\% \quad (55)$$

Donde:

*PPFO*: Peso de polvos finos obtenidos usando martillos óptimos

*PPFSO*: Peso de polvos finos obtenidos usando martillos sin optimizar



**Figura 53. Comparación de obtención de polvos finos usando ambos martillos**

**Tabla 26. Tabla comparativa de eficiencias de corte**

<b>masas totales por experimento (g)</b>	<b>peso polvos finos martillos sin optimizar (g)</b>	<b>peso polvos finos martillos óptimos (g)</b>	<b>% eficiencia corte martillo sin optimizar</b>	<b>% eficiencia corte martillo óptimos</b>	<b>Diferencia porcentual (%)</b>
60	10	12	16,67	20	19,98
120	19	26	15,83	21,67	36,84

240	52	76	21,67	31,67	46,15
360	91	141	25,28	39,17	54,94

La siguiente comparación se hace mostrando los consumos de potencias promedio obtenidas en cada experimento obtenidos de ambos experimentos, el cual se observa en la tabla 28, teniendo en cuenta que para obtener el porcentaje de reducción de potencia de potencia consumida se aplicó la ecuación (56) sin tener en cuenta las covarianzas. Lo que se concluye esta tabla es que entre mayor es el flujo de alimentación, mayor es el consumo de potencia eléctrica en el caso donde los martillos son convencionales, en el caso donde el martillo es óptimo, se aplica esto en los casos donde los flujos de alimentación de bagazo son 24 g/min, 48 g/min y 72 g/min; esto se debe a que en el caso donde los flujos son de 12 g/min y 24 g/min, el molino se comporta como si no tuviera carga, es decir, cuando el flujo de alimentación es igual a 0 g/min . Para el caso donde el flujo es 72 g/min es donde presenta resultados más sobresalientes, ya no sólo presenta los consumos de potencia mayores, sino que también presenta la mayor reducción de potencia consumida del molino óptimo con respecto al convencional, que fue de 26,5%.

$$\left( \frac{PPMO - PPMSO}{PPMSO} \right) * 100\% \quad (56)$$

Donde:

*PPMO*: Potencia promedio usando martillos óptimos

*PPMSO*: Potencia promedio usando martillos sin optimizar

**Tabla 27. Valores de potencia promedio tomado de los experimentos anteriores.**

Flujo de alimentación de bagazo de caña de azúcar	Potencia promedio de los molinos sin optimizar	Potencia promedio de los molinos con martillos óptimos	% de reducción en potencia consumida
$0 \frac{g}{min} = 0 \frac{Kg}{s}$	644,90 ± 11,06	608,20 ± 5,23	-5,69
$12 \frac{g}{min} = 0,0002 \frac{Kg}{s}$	655,82 ± 6,46	607,98 ± 9,48	-7,29

$24 \frac{g}{min} = 0,0004 \frac{Kg}{s}$	$659,29 \pm 8,15$	$605,80 \pm 24,01$	-8,11
$48 \frac{g}{min} = 0,0008 \frac{Kg}{s}$	$729,16 \pm 66,47$	$669,91 \pm 47,58$	-8,13
$72 \frac{g}{min} = 0,0012 \frac{Kg}{s}$	$951,66 \pm 384,39$	$699,48 \pm 63,15$	-26,50

La última comparación que se hace es basado en la ecuación (3), donde según la unidad 2.2.6, es la que aplica Figueroa et al [36] para estudiar cuanto es el consumo de energía eléctrica por kilogramo de muestra en los molinos de martillos, la cual se aprecia en la tabla 29, usando además las potencias promedio de la tabla 28 para la solución de la ecuación (3). En la tabla se evidencia que entre mayor es el flujo de alimentación, mayor es el consumo de energía eléctrica, y que cuando se usa martillos óptimos, menor es el consumo de energía eléctrica en todos los casos, en especial en el caso donde los flujos de alimentación son de 48 g/min y 72 g/min, ya que en ambos el consumo de energía eléctrica usando martillos óptimos es aproximadamente de 21%, en cambio cuando se usa martillos convencionales, los consumos de energía eléctrica son de 29% y 71% respectivamente para los dos mismos casos de flujos de alimentación. En los casos donde los flujos son iguales a 12 g/min y 24 g/min, cuando se usa martillos óptimos, el consumo de energía da negativo, el motivo de esto es que matemáticamente la potencia promedio es un poco mayor sin carga que con carga, pero analíticamente lo que sucede ahí es que el comportamiento en estos dos casos se podría considerar como si no tuvieran carga, por ende se consideraría como si no consumiera energía eléctrica en estos casos.

**Tabla 28. Consumos de energía durante el proceso de triturado**

Flujo de alimentación de bagazo de caña de azúcar	Consumo de energía eléctrica usando martillos sin optimizar $\left(\frac{W*h}{Kg}\right)$	Consumo de energía eléctrica usando martillos óptimos $\left(\frac{W*h}{Kg}\right)$
$12 \frac{g}{min} = 0,72 \frac{Kg}{h}$	15,16	-0,31
$24 \frac{g}{min} = 1,44 \frac{Kg}{h}$	9,99	-1,67

---

$48 \frac{g}{min} = 2,88 \frac{Kg}{h}$	29,26	21,43
$72 \frac{g}{min} = 4,32 \frac{Kg}{h}$	71,01	21,13

## **5. Conclusiones, trabajos futuros y aportes a la investigación**

### **5.1. Conclusiones**

El análisis del funcionamiento del molino de martillos en vacío, permitió conocer el consumo de potencia y generar un modelo basado en mecánica de Lagrange, el cual, es base para el proceso de optimización topológica del martillo.

La construcción de modelos matemáticos para el consumo de potencia en función de la cantidad de material introducido para el procesamiento permite evidenciar los cambios de consumo de potencia con la variación de la geometría en función de las cargas de material a procesar.

El cambio en la geometría de los martillos mostró que se aumentó la cantidad de producción de polvos finos en el mismo periodo de tiempo, en un 55% y se redujo en un 51% el consumo de potencia con respecto al uso de martillos sin optimizar.

### **5.2. Trabajos futuros**

- Plantear un modelo matemático donde relacione consumo de energía con tamaño de partícula del bagazo de caña de azúcar molido con molino de martillos.
- Rediseño de la criba para reducir el consumo de potencia del molino de martillos.
- Rediseño de carcaza para aumentar la producción de polvos finos y para reducir el consumo de potencia.
- Optimizar la máquina extrusora para economizar y aumentar la producción de pellets.

### 5.3. Aportes a la investigación

La tabla 29 describe los productos que se obtuvieron de esta tesis en el área de la investigación

**Tabla 29. Aportes que hizo la tesis a la investigación**

<b>Producto</b>	<b>Nombre</b>	<b>Entidad</b>	<b>Etapas</b>
<b>Artículo Científico</b>	” Modelo cinemático del martillo de un molino de martillos operando sin carga empleando la mecánica de Langrange”	Revista: USBMed	Publicado: Marzo 2019  DOI: 10.21500/20275846.3871
<b>Artículo científico</b>	“Evaluación de la potencia del molino de martillo al procesar bagazo de caña de azúcar”	Revista: Revista Ciencias agrícolas	Aprobado y será publicado pronto.
<b>Artículo científico</b>	“Selección De Criterios Para La Elección Para Máquinas Agroindustriales Para Molienda Con Base En Su Caracterización”	Revista: Ciencia Y Tecnología Agropecuaria	Aprobado y sometido a correcciones por el jurado calificador de la revista

<b>Patente</b>	“Martillos en forma de L para molino”	Abogado: Edison Valery Espinoza	En proceso  Etapa actual: Radiación de solicitud de patente
<b>Proyecto laboral</b>	“Mill for the optimization of sugar cane bagasse, so that the biomass is more effective in the energy generation process”	Enviado a la ONG ACUMEN en nombre de FUNMABI para financiamiento de prototipo de molino de martillos para ser usado en la generación de energía usando bagazo de caña panelera como combustible	Etapa actual: Pasó primera etapa de selección, está por iniciar la segunda etapa

## 6. Bibliografía

- [1] L. Nanjing Pellet Mill Co., “History\_and\_background\_of\_pellets @ www.pelletmill.net,” *AKG BiofuelTech Co., Ltd.*, 2011. [Online]. Available: [http://www.pelletmill.net/News/History\\_and\\_background\\_of\\_pellets.html](http://www.pelletmill.net/News/History_and_background_of_pellets.html).
- [2] J. Wang, “the\_history\_of\_pellet\_mill @ www.akgbioguide.com,” 2011. [Online]. Available: [http://www.akgbioguide.com/the\\_history\\_of\\_pellet\\_mill.html](http://www.akgbioguide.com/the_history_of_pellet_mill.html). [Accessed: 14-Jan-2014].
- [3] U.S. Department of Energy: Energy Information Administration, “Crude Oil Prices: West Texas Intermediate (WTI).” Cushing, Oklahoma, p. 142, 2014.
- [4] F. Ballester, “Contaminación Atmosférica, Cambio Climático y Salud,” *Rev Esp Salud Pública*, vol. 79, pp. 159–175, 2005.
- [5] A. Group, “History-Pellet-Mill @ www.ayimpex.com,” 2012. [Online]. Available: <http://www.ayimpex.com/FAQ/History-Pellet-Mill.html>.
- [6] O. Almazán Del Olmo, E. Cazanova Cabeza, L. O. . Gálvez Taupier, J. Lodos Fernández, N. Fernández Rodríguez, and A. J. . Abril González, “Parte V. El bagazo de la caña de azúcar. Propiedades, constitución y potencial,” in *Patrimonio científico del nuevo ICIDCA*, E. ICIDCA, Ed. La Habana, Cuba, 2016.
- [7] A. C. Agüero, J. R. Pisa, C. J. Agüero, and A. T. Bugeau, “Extensión Poder Calorífico del Bagazo de Caña de Azúcar,” *Rev. CET*, vol. 13, pp. 32–37, 2004.
- [8] C. Tiwari, “Producing fuel briquettes from sugarcane waste,” in *Our Global Future*, 2011.
- [9] M. C. García, “Hornillas Paneleras Evaluación De Su Impacto Ambiental,” *www.corpoica.org.co*, vol. 4, pp. 20–32, 2004.

- [10] A. Pirraglia, R. Gonzalez, and D. Saloni, "Techno-economical analysis of wood pellets for U.S manufacturers," *Bio Resour.*, vol. 5, no. 4, pp. 2374–2390, Sep. 2010.
- [11] J. P. Carroll and J. Finnan, "Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws," *Biosyst. Eng.*, vol. 112, pp. 151–159, 2012.
- [12] R. Jannasch, Y. Quan, and R. Samson, "A Process and Energy Analysis of Pelletizing Switchgrass," 2001.
- [13] K. Koch, "Hammermills and Roller mills," *kansas State Univ.*, pp. 1–8, 1996.
- [14] J. Bradshaw, "Hammermills versus roller mills," *World Grain*, 2009. [Online]. Available: <https://www.world-grain.com/articles/10011-hammermills-versus-roller-mills>. [Accessed: 17-Aug-2012].
- [15] J. E. Arpi Trujillo and C. S. Calderón Todal, "CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE LOS DISTINTOS SISTEMAS PELETIZADORES PARA LA ELECCIÓN DEL MÁS ÓPTIMO," in *Diseño De Una Máquina Peletizadora En Base A La Disponibilidad De Residuos Madereros De la Ciudad De Cuenca Para Su Aprovechamiento Energético*, 2010, pp. 80–123.
- [16] V. S. P. Bitra *et al.*, "Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions," *Powder Technol.*, vol. 193, no. 1, pp. 32–45, Jul. 2009.
- [17] L. J. Naimi, F. Collard, X. Bi, C. J. Lim, and S. Sokhansanj, "Development of size reduction equations for calculating power input for grinding pine wood chips using hammer mill," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 6, pp. 397–405, 2016.
- [18] N. Yancey, C. T. Wright, and T. L. Westover, "Optimizing hammer mill performance through screen selection and hammer design," *Biofuels*, vol. 4, no. 1, pp. 85–94, Jan. 2013.
- [19] A. F. Arias Leiva, L. V. Tamara Matera, and F. Arbelaez Soto, *Sector panelero colombiano*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006.
- [20] A. MOJICA PIMIENTO and J. PAREDES VEGA, "CENTRO REGIONAL DE ESTUDIOS ECONOMICOS BUCARAMANGA: EL CULTIVO DE LA CAÑA PANELERA Y LA AGROINDUSTRIA PANELERA EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER," 2004.
- [21] O. F. Castellanos D., L. M. Torres P., and F. M. Diego Hernando, "AGENDA PROSPECTIVA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA

- LA CADENA PRODUCTIVA DE LA PANELA Y SU AGROINDUSTRIA EN COLOMBIA.” MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, 2010.
- [22] C. J. . Agüero, J. R. . Pisa, and R. L. Andina, “Consideraciones Sobre el Aprovechamiento Racional del Bagazo de Caña como Combustible,” *Investig. y Desarro.*, vol. 27, pp. 1–8, 2006.
- [23] D. O. N. De Guzman Ospina, “Diseño De Un Molino De Martillo De Doble Eje,” Universidad Nacional De Ingenieria, 2006.
- [24] S. M. Henderson and R. L. Perry, *Agricultural Process Engineering*, Second Edi. United States, 1966.
- [25] Quiminet.com, “aproveche-las-caracteristicas-de-los-molinos-coloidales-en-la-industria-farmaceutica-2570426 @ www.quiminet.com.” 2011.
- [26] W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriott, *Operaciones Unitarias En Ingeniería Química*, Cuarta Edi. Madrid, España: EDIGRAFOS, S. A., 1991.
- [27] M. E. Balcazar Díaz and J. P. Díaz, Guamba, “Diseño de una trituradora de cacao,” Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [28] C. Calviño, “trituracion-mineral2 @ www.monografias.com,” *www.monografias.com*, 2013. [Online]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos69/trituracion-mineral/trituracion-mineral2.shtml>. [Accessed: 15-Jan-2014].
- [29] L. A. Gomez Rodriguez, “Molienda @ procesosbio.wikispaces.com,” <http://procesosbio.wikispaces.com/>, 2014. [Online]. Available: <http://procesosbio.wikispaces.com/Molienda>.
- [30] L. Shanghai Zenith Mining and Construction Machinery Co., “Catálogo de trituradora de mandíbula(Trituradora de quijada),” no. 416. Shanghai, China, p. 58386258.
- [31] Z. Hao, “Horizontal Roller Mill,” US 7,118,057 B2, 2006.
- [32] H. González S., A. Toro B., and E. Cortes M., “Requerimientos Para La Reducción De Tamaño En Molinos De La Semilla De Vitabosa,” *Sci. Tech. Año XV*, vol. 42, p. 7, 2009.
- [33] Wordpress, “Peletizadoras.” [Online]. Available: <http://plantasdepellets.wordpress.com/peletizadoras/>. [Accessed: 19-Mar-2013].
- [34] A. Trujillo and J. E. Calderón, *Diseño de una máquina peletizadora de madera.* .
- [35] S. Mani, S. Sokhansanj, X. Bi, A. Turhollow, and others, “Economics of producing

- fuel pellets from biomass,” *Appl. Eng. Agric.*, vol. 22, no. 3, p. 421, 2006.
- [36] L. M. Cortazar Figueroa, R. Meléndez Pérez, and D. M. Oliver Hernández, “Consumo De Energía Y Distribución De Tamaño De Partícula En La Molienda De Canela (*Cinnamomum zeylanicum*) Y Pimienta Negra (*Piper nigrum* L),” *Rev. Mex. Ing. Química*, vol. 7, no. 2, pp. 123–130, 2008.
- [37] Alvan Blanch, “A guide to extrusion,” Reino Unido.
- [38] M. Kutz, *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*, Segunda Ed. New York, 2013.
- [39] R. P. Singh and D. R. Heldman, *Introduction to Food Engineering*, Cuarta Ed. Davis, California & Mason, Ohio, 2009.
- [40] Attritors, “Chocolate And Compound Coating (Catalogue).” Union Process, p. 6.
- [41] J. S. Pérez de Corcho Fuentes and F. Garbati Pegna, “Modelo matemático para la demanda de potencia de un aparato de corte de eje vertical para la trituración de rastrojos,” *Ing. E Investig.*, vol. 28, no. 3, p. 4, 2008.
- [42] A. Martínez Rodríguez, P. Hernandez, Valdez, J. Díaz Suárez, Y. Maturell Padín, and D. Vega Riscart, “Modelo matemático racional para el cálculo de la potencia consumida en molinos forrajeros de tambor,” *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 13, no. 4, 2004.
- [43] P. A. . Valdés Hernández, A. Martínez Rodríguez, Y. Valencia Orozco, and E. Díaz, Brito, “Validación del modelo de cálculo de la potencia consumida por las picadoras de forraje del tipo de tambor con alimentación manual,” *Tractores Y Máquinas Agrícolas*, vol. 21, no. 2, pp. 5–10, Jan. 2012.
- [44] F. Engineering, “Dry Processing. Pin Mill,” 2014. [Online]. Available: <https://www.foodengineeringmag.com/articles/92620-pin-mill>. [Accessed: 10-Jul-2019].
- [45] M. Sinnott, P. W. Cleary, and R. Morrison, “Analysis of stirred mill performance using DEM simulation : Part 1 – Media motion , energy consumption and collisional environment,” *Miner. Eng.*, vol. 19, pp. 1537–1550, 2006.
- [46] M. Meghwal and T. K. Goswami, “Comparative study on ambient and cryogenic grinding of fenugreek and black pepper seeds using rotor , ball , hammer and Pin mill,” *Powder Technol.*, vol. 267, pp. 245–255, 2014.
- [47] S. Breitung-faes and A. Kwade, “Nano particle production in high-power-density mills,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 86, pp. 390–394, 2008.

- [48] P. S. Shelake, M. N. Dabhi, R. D. Nalawade, and M. L. Jadhav, "Design and Development of Pin Mill for Size Reduction of Turmeric ( *Curcuma longa* ) Rhizome," *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 10, pp. 2102–2107, 2017.
- [49] P. Barnwal, K. K. Singh, A. Sharma, A. K. Choudhary, and S. N. Saxena, "Influence of pin and hammer mill on grinding characteristics , thermal and antioxidant properties of coriander powder," *Assoc. Food Sci. Technol. Springer*, vol. 52, no. December, pp. 7783–7794, 2015.
- [50] F. C. Vargas Tagua and W. Guerrero Salazar, "Transformación microbiana del bagazo de caña panelera en azúcares fermentables utiles para la obtención de bioetanol.," Uinversidad Industrial de Santander, 2010.
- [51] A. Córdoba Sequeira, "Caracterización De Propiedades Relacionadas Con La Textura De Suspensiones De Fibras Alimentarias," Universidad Politécnica De Valencia, 2005.
- [52] F. H. Chávez Vela and G. Ramos Vásquez, "DISEÑO DE UN MOLINO DE MARTILLOS PARA CEREALES Y FORRAJE DE 500 kg/h EN EL ANEXO DE BATANGRANDE, LAMBAYEQUE," Universidad Señor De Sipán, 2018.
- [53] L. Atarama Valdiviezo, "SISTEMATIZACIÓN DE DISEÑO DE MOLINOS DE MARTILLOS FIJOS PARA GRANO," Universidad de Piura, 2018.
- [54] B. Ozkan, H. Akcaoz, and C. Fert, "Energy input – output analysis in Turkish agriculture," *Pergamon*, vol. 29, pp. 39–51, 2004.
- [55] J. M. Chaparro Castro, "Potencia en Máquinas Agrícolas," *Ing. e Investig.*, no. 32, pp. 4–19, 1995.
- [56] Z. . Chen and E. Spooner, "Grid power quality with variable speed wind turbines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, no. 2, pp. 148–154, Jun. 2001.
- [57] P. de la C. Martinez Nodal, I. ; Rodríguez Rico, G. ; Esperanza Pérez, and J. ; Leiva Mas, "Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos," *AFINIDAD*, vol. 71, no. 53, pp. 57–62, 2014.
- [58] F. P. . Beer, E. R. Johnston Jr, and P. J. . Cornwell, *Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica*, vol. 136, no. 1. 2007.
- [59] A. S. Poznyak, *MODELADO MATEMÁTICO de los Sistemas Mecánicos, Electricos y Electromecánicos*. 2005.
- [60] E. Peña Pitarch, "Màquina per cremar les males herbes dels cultius," Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech, 2004.