



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **DIRECCIÓN DE POSGRADOS**

### **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

**Título:**

---

**“DIAGNÓSTICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL PROCESO DE MOLIENDA DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS, CON MOLINO DE MARTILLOS, EN LA INDUSTRIA AROMAS DE TUNGURAHUA EN LA CIUDAD DE AMBATO. DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN DEL PRODUCTO”.**

---

**Autor: Ing. Franklin Manuel Silva Monteros Mg.**

**Tutor: PhD. Iliana González Palau**

**LATAACUNGA – ECUADOR**

Febrero – 2016



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADO

Latacunga – Ecuador

---

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe en consideración de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Silva Monteros Franklin Manuel, con el título de tesis: **“Diagnóstico de la eficiencia energética en el proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos, en la industria Aromas de Tungurahua en la ciudad de Ambato. Diseño de un sistema automatizado de control de velocidad de alimentación del producto”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa del Proyecto de Investigación y Desarrollo.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga febrero de 2015

Para constancia firman:

.....  
Msc. Ángel León  
PRESIDENTE

.....  
PhD. Juan José La Calle  
MIEMBRO

.....  
PhD. Juan Mato  
MIEMBRO

.....  
MSc. Fabián Salazar  
OPONENTE

## **AVAL DEL DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

Latacunga, enero de 2016

En mi calidad de Directora del Proyecto de Investigación y Desarrollo, presentado por el Ing. Silva Monteros Franklin Manuel, egresado de la Maestría en Gestión de Energías, previa la obtención del mencionado grado académico, cuyo título es **“DIAGNÓSTICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL PROCESO DE MOLIENDA DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS, CON MOLINO DE MARTILLOS, EN LA INDUSTRIA AROMAS DE TUNGURAHUA EN LA CIUDAD DE AMBATO. DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN DEL PRODUCTO”**.

Considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador.

Atentamente

Ph D Iliana González Palau  
DIRECTORA DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

## **AUTORÍA**

Yo, Franklin Manuel Silva Monteros, portador del número de cédula 1801962125, declaro que el presente Proyecto de Investigación y Desarrollo, es fruto de mi esfuerzo, responsabilidad y disciplina, logrando que los objetivos propuestos se culminen con éxito.

Atentamente

Silva Monteros Franklin Manuel

C. C. 180196212-5

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por su infinita bondad, a mis padres por su apoyo incondicional, a mi esposa e hijas por su amor, por ser mi empuje y fortaleza.

A mis hermanos y a mi familia entera pues de una u otra manera han sido mi apoyo y mi fuerza.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, a sus docentes por su calidad y amabilidad, al personal administrativo por su ayuda y calidez.

A mi tutora, Iliana González, por su amistad, sus enseñanzas, el apoyo constante y por su aporte profesional de excelencia.

Franklin

## **DEDICATORIA**

Este trabajo, se lo dedico a DIOS, a mis padres, a mi esposa, a mis hijas y a mi familia entera.

Franklin

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....   | ii        |
| AUTORÍA.....   | iii       |
| AGRADECIMIENTO.....  | v         |
| DEDICATORIA .....  | vi        |
| ÍNDICE .....   | vii       |
| ÍNDICE DE TABLAS .....   | x         |
| ÍNDICE DE GRAFICAS .....   | xi        |
| RESUMEN.....   | xiii      |
| ABSTRACT.....  | xiv       |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>SITUACIÓN PROBLÉMICA.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>OBJETO Y PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Objeto de estudio.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Formulación del problema .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>CAMPO DE ACCIÓN Y OBJETIVO GENERAL DE LA<br/>INVESTIGACIÓN .....</b>                  | <b>4</b>  |
| <b>Campo de acción .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Objetivo General .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>SISTEMAS DE TAREAS.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>VISIÓN EPISTEMOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>                                   | <b>6</b>  |
| <b>ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE<br/>INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO .....</b> | <b>8</b>  |
| <b>CAPÍTULO I.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>1. EL MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>1.1. Caracterización detallada del objeto de investigación. ....</b>                  | <b>10</b> |
| <b>1.1.1. Descripción del objeto.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>1.1.2. Delimitación espacio-temporal.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>1.2. El marco teórico .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>1.2.1. Argumentación acerca de la necesidad de la investigación. ....</b>             | <b>11</b> |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 1.2.2.    | Antecedentes de estudio .....  | 12 |
| 1.2.3.    | Fundamentación teórica .....   | 14 |
| 1.2.3.1.  | Proceso de molienda .....  | 15 |
| 1.2.3.2.  | Características de los molinos .....   | 16 |
|           | Molino de bolas .....  | 16 |
|           | Molino de rodillos .....   | 18 |
|           | Molino de martillos .....  | 20 |
| 1.2.3.3.  | Eficiencia energética .....  | 23 |
| 1.2.3.4.  | Caracterización energética .....   | 25 |
| 1.2.3.5.  | Indicadores de eficiencia energética .....   | 26 |
| 1.2.3.6.  | Gestión energética .....   | 28 |
| 1.2.3.7.  | Auditoría energética .....   | 30 |
| 1.2.3.8.  | Diseño de un sistema de gestión energética .....   | 31 |
| 1.2.3.9.  | Automatización .....   | 33 |
| 1.2.3.10. | Sensores .....   | 36 |
| 1.3.      | Fundamentos de la investigación .....  | 38 |
| 1.3.1.    | El problema científico .....   | 38 |
| 1.3.2.    | Viabilidad teórica y práctica .....  | 39 |
| 1.4.      | Bases teóricas particulares de la investigación .....                                      | 39 |
| 1.4.1.    | Variables de investigación .....   | 39 |
| 1.4.2.    | Operacionalización de las variables .....  | 40 |
|           | <b>CAPÍTULO II</b> .....   | 42 |
| 2.        | <b>METODOLOGÍA</b> .....   | 42 |
| 2.1.      | Caracterización .....  | 42 |
| 2.2.      | Técnicas para la obtención de datos .....  | 45 |
| 2.3.      | Procedimiento utilizado para determinar los datos medidos necesarios .....                 | 46 |
| 2.4.      | Datos obtenidos .....  | 47 |
| 2.4.1.    | Datos obtenidos de las entrevistas .....   | 47 |
| 2.4.2.    | Metodología para la determinación de la velocidad óptima de alimentación de producto ..... | 49 |
| 2.4.2.1.  | Muestreo rápido .....  | 52 |
| 2.4.2.2.  | Muestreo detallado .....   | 53 |
| 2.5.      | Procedimiento para la obtención de la velocidad óptima de molienda .....                   | 55 |
|           | <b>CAPÍTULO III</b> .....  | 56 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>3. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....   | 56  |
| <b>3.1. Resultados obtenidos en la entrevista</b> .....  | 56  |
| <b>3.2. Resultados obtenidos en la determinación de la velocidad de alimentación de producto</b> ..... | 56  |
| <b>3.2.1. Muestreo rápido</b> .....  | 57  |
| <b>3.2.2. Muestreo detallado</b> .....   | 61  |
| <b>3.3. Incidencia de corregir la velocidad de alimentación de producto</b>                            | 65  |
| <b>CAPÍTULO IV</b> .....   | 69  |
| <b>4. PROPUESTA</b> .....  | 69  |
| <b>4.1. Título de la propuesta</b> .....   | 69  |
| <b>4.2. Justificación de la propuesta</b> .....  | 69  |
| <b>4.3. Objetivo de la propuesta</b> .....   | 69  |
| <b>4.3.1. Objetivo general</b> .....   | 69  |
| <b>4.3.2. Objetivos específicos</b> .....  | 70  |
| <b>4.4. Estructura de la propuesta</b> .....   | 70  |
| <b>4.5. Desarrollo de la propuesta</b> .....   | 71  |
| <b>4.5.1. Diseño del sistema automático</b> .....  | 71  |
| <b>4.5.2. Diseño del módulo de acondicionamiento de señal</b> .....                                    | 73  |
| <b>4.5.3. Programación de equipos</b> .....  | 74  |
| <b>4.5.4. Diseño del tablero de control</b> .....  | 82  |
| <b>4.5.5. Análisis de costos</b> .....   | 85  |
| <b>4.5.6. Evaluación socio-económico-ambiental de la propuesta</b> .....                               | 87  |
| <b>En lo social</b> .....  | 87  |
| <b>En lo económico</b> .....   | 87  |
| <b>En lo ambiental</b> .....   | 88  |
| <b>4.6. Verificación de la propuesta</b> .....   | 88  |
| <b>4.6.1. Modelado matemático del sistema automático de molienda</b> ....                              | 88  |
| <b>4.6.2. Resultados de la propuesta</b> .....   | 95  |
| <b>4.6.3. Recomendaciones de la propuesta</b> .....  | 95  |
| <b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....  | 96  |
| <b>RECOMENDACIONES</b> .....   | 97  |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....  | 98  |
| <b>ANEXO</b> .....   | 101 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Indicadores de eficiencia energética .....   | 27 |
| Tabla 2 Operacionalización de la variable independiente.....   | 40 |
| Tabla 3 Operacionalización de la variable dependiente.....   | 41 |
| Tabla 4 Datos de muestreo rápido para la molienda de alfalfa.....  | 52 |
| Tabla 5 Datos de muestreo rápido para la molienda de manzana.....  | 52 |
| Tabla 6 Datos de muestreo rápido para la molienda de papaya.....   | 53 |
| Tabla 7 Datos de muestreo detallado para la molienda de alfalfa.....   | 53 |
| Tabla 8 Datos de muestreo detallado para la molienda de manzana.....   | 54 |
| Tabla 9 Datos de muestreo detallado para la molienda de papaya.....  | 55 |
| Tabla 10 Mejora directa, en energía y costos al trabajar en el punto de máxima eficiencia .....                                      | 66 |
| Tabla 11 Mejora por aumento de polvo útil, en energía y costos al trabajar en el punto de máxima eficiencia.....                     | 67 |
| Tabla 12 Mejora por aumento de polvo útil, en energía y costos al trabajar en el punto de máxima eficiencia .....                    | 68 |
| Tabla 13 Corriente del motor del molino del martillo en función de la velocidad de alimentación del producto al molino.....          | 71 |
| Tabla 14 Descripción y valores de los parámetros del variador.....   | 75 |
| Tabla 15 Lista de materiales y su costo .....  | 86 |
| Tabla 16 Datos de la respuesta de la corriente del motor del molino debido a una entrada escalón de frecuencia de 20 Hz a 40 Hz..... | 90 |

## ÍNDICE DE GRAFICAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Molino de bolas .....   | 17 |
| Figura 2 Molino de bolas continuo, tipo rejilla, marca Darcy .....   | 18 |
| Figura 3 Molino de rodillos de alta compresión, marca Alpine.....  | 19 |
| Figura 4 Molino de rodillo de doble paso .....   | 20 |
| Figura 5 Esquema de la cámara de un molino de martillos .....  | 21 |
| Figura 6 Molino de martillos de la empresa Aromas del Tungurahua.....                                      | 23 |
| Figura 7 Martillos del molino de frutos y hojas secas de la empresa Aromas del<br>Tungurahua .....         | 23 |
| Figura 8 Ciclo básico de una gestión energética .....  | 30 |
| Figura 9 Sistema de control automático en lazo cerrado .....   | 35 |
| Figura 10 Transformadores de corriente para diferentes rangos.....   | 37 |
| Figura 11 Diagrama de flujo para validar la calidad de los datos .....                                     | 47 |
| Figura 12 Diagrama de flujo para validar la calidad de los datos .....                                     | 51 |
| Figura 13 Polvo útil /Total obtenido (%) Vs frecuencia del motor de molino (Hz),<br>alfalfa.....           | 57 |
| Figura 14 Energía utilizada (kW.h) Vs Frecuencia del motor del molino (Hz),<br>alfalfa.....                | 58 |
| Figura 15 Tiempo de molienda (min) Vs Frecuencia aplicada al motor de molino<br>(Hz), alfalfa. ....        | 58 |
| Figura 16 Corriente del motor del molino (A) Vs frecuencia aplicada motor del<br>molino (Hz), alfalfa..... | 59 |
| Figura 17 Total obtenido/total molido (%) Vs frecuencia aplicada motor del<br>molino (Hz), alfalfa.....    | 60 |
| Figura 18 Polvo útil /Total obtenido (%) Vs velocidad del motor de molino (Hz),<br>alfalfa.....            | 61 |
| Figura 19 Energía utilizada (kW.h) Vs frecuencia aplicada al motor del molino<br>(Hz), alfalfa. ....       | 62 |
| Figura 20 Polvo útil /Total obtenido (%) Vs velocidad del motor de molino (Hz),<br>manzana.....            | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 21 Energía utilizada (kW.h) Vs frecuencia aplicada al motor del molino (Hz), manzana. ....  | 63 |
| Figura 22 Polvo útil /Total obtenido (%) Vs frecuencia aplicada al motor de molino (Hz), papaya. ....  | 64 |
| Figura 23 Energía utilizada (kW.h) Vs frecuencia aplicada al motor del molino (Hz), papaya. ....   | 65 |
| Figura 24 Representación del proceso .....   | 72 |
| Figura 25 Circuito de acondicionamiento de señal. ....   | 74 |
| Figura 26 PLC JAZZ.....  | 81 |
| Figura 27 Disposición física de los elementos dentro del tablero.....  | 84 |
| Figura 28 Disposición física de los elementos en la parte frontal del tablero.....   | 84 |
| Figura 29 Esquema mecánico del proceso automático .....  | 85 |
| Figura 30 Lazo de control para el sistema de molienda.....   | 86 |
| Figura 31 Representación en diagrama de bloques de un sistema con una entrada y una salida, (a): representación en el dominio del tiempo y (b): representación en el dominio de la frecuencia compleja. .... | 89 |
| Figura 32 Gráfica de la respuesta de la corriente del motor del molino debido a una entrada escalón de frecuencia de 20 Hz a 40 Hz .....   | 91 |
| Figura 33 Función de transferencia resultante de aplicar la función IDENT .....  | 91 |
| Figura 34 Diagrama de simulación creado con SIMULINK .....   | 92 |
| Figura 35 Respuesta del sistema ante una entrada escalón. Línea azul: entrada escalón; Línea roja: respuesta del sistema. ....   | 92 |
| Figura 36 Diagrama de simulación del sistema con control PID creado con SIMULINK .....   | 92 |
| Figura 37 Respuesta del sistema ante una entrada escalón. ....   | 93 |
| Figura 38 Respuesta del sistema ante una entrada con varios escalones. Línea azul: entrada escalón; Línea roja: respuesta del sistema. ....  | 93 |
| Figura 39 Diagrama de simulación del sistema con control PID y perturbación, creado con SIMULINK.....  | 94 |
| Figura 40 Respuesta del sistema ante varios escalones incluida perturbaciones. Línea azul: entrada escalón; Línea roja: respuesta del sistema.....   | 94 |

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

**TÍTULO: Diagnóstico de la eficiencia energética en el proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos, en la industria Aromas de Tungurahua en la ciudad de Ambato. Diseño de un sistema automatizado de control de velocidad de alimentación del producto**

**AUTOR:** SILVA MONTEROS Franklin Manuel.

**TUTOR:** PhD. GONZÁLEZ PALAU Iliana.

**RESUMEN**

En la Industria Aromas del Tungurahua entre varios de sus procesos está el de la molienda de productos deshidratados mediante el uso de un molino de martillos, la velocidad de alimentación del producto se la escoge de acuerdo al producto y a la experiencia de las personas que manejan el proceso de molienda. Si bien la experiencia permite que el punto de trabajo sea bueno, no es el óptimo, por tanto es necesario determinar la velocidad óptima de alimentación del producto, y su incidencia en la eficiencia energética, ya que su desconocimiento provoca que la productividad no sea la adecuada, se tiene un consumo en exceso de energía eléctrica y se pone en riesgo la efectividad y competitividad de la empresa. El diseño de un sistema automatizado de control de velocidad para la alimentación del producto, mediante la utilización de variadores de velocidad y autómatas programables, permite mejorar su eficiencia energética y mantener el punto óptimo de operación. Para caracterizar el proceso y determinar correctamente el tipo de automatismo necesario, se realizan varias moliendas midiendo su peso, consumo de energía eléctrica, el tiempo que se demora y la calidad obtenida, hasta encontrar la velocidad que ofrece los mayores beneficios, para ello se utiliza el enfoque empirista-inductivo. Luego para el diseño del sistema automático se aplica un método racionalista-deductivo.

**Descriptor:** Molienda, molino de martillos, productos deshidratados, eficiencia energética, productividad, sistema automático.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

**TOPIC: “DIAGNOSIS OF ENERGY EFFICIENCY IN THE MILLING PROCESS OF DEHYDRATED PRODUCTS WITH HAMMER MILL IN AROMAS OF TUNGURAHUA INDUSTRY IN AMBATO CITY. DESIGN OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE PRODUCT FEED RATE”.**

**AUTOR:** SILVA MONTEROS Franklin Manuel.

**ABSTRACT**

*The Industry of Aromas del Tungurahua, into several of its processes is the grinding of dried products using a hammer mill, the feed rate of the product is chosen according to the product and the people experience that run the milling process. While experience allows the operating point be good, is not optimal, so it is necessary to determine the optimum feed rate of the product and its impact on energetic efficiency, so that the unawareness in it take account in the productivity, it has a consumption in excess of electrical energy and the effectiveness and competitiveness of the company is affected. The design of an automated speed control system to monitor the feed rate of the product by means of variable speed drives and Programmer Logic Controllers let to improve energetic efficiency and maintain the optimal operating point. To characterize the process and determine correctly the type of automation required, several grindings are performed by measuring their weight, power consumption, the time used and the quality obtained, until finding the speed that provides the greatest benefits, for this reason it is used a empiricist-inductive approach. Then for automatic design it is applied a rationalist-deductive approach.*

**Descriptors:** *Grinding, hammer mill, dehydrated products, energy efficiency, productivity, automated system.*

## INTRODUCCIÓN

### SITUACIÓN PROBLÉMICA

La energía es una necesidad básica para los seres humanos, sin embargo ésta debe ser usada con responsabilidad ya que a futuro puede ser escasa. A medida que la población crece, también crece la demanda de energía, actualmente a nivel mundial existe una brecha entre la demanda y la producción de energía que es superior a 10 %. (KULKARNI, 2013)

En Ecuador, el Ministerio de Industrias y Productividad, en base al plan del Buen Vivir, está interesado en impulsar la transformación de la matriz energética con políticas derivadas de Estado, como la Estrategia Nacional de Cambio Climático que tiene como una de sus funciones la mitigación del cambio climático fomentando la eficiencia y soberanía energética, así como el cambio gradual de la matriz energética.

El estado promueve el diseño, elaboración, construcción , implementación y utilización de productos y servicios que ahorren energía eléctrica consumida, que no sean tóxicos y de bajo impacto ambiental a través de la identificación y ejecución de acciones inclinadas a alcanzar la eficiencia energética, a nivel de uso doméstico e industrial según los artículos y políticas emitidas en la Constitución de la República del Ecuador establecida en la Asamblea Constituyente 2008 (MIPRO, 2014).

La carta magna declara en el capítulo cuarto: Soberanía económica Sección primera Sistema Económico y Política Económica;

**Art. 283** “El sistema económico es social y solidario; reconoce al ser humano como sujeto y fin; propende a una relación dinámica y equilibrada entre sociedad, Estado y mercado, en armonía con la naturaleza; y tiene por objetivo garantizar la producción y reproducción de las condiciones materiales e inmateriales que posibiliten el buen vivir”..

Y además en el capítulo segundo biodiversidad y recursos naturales Sección séptima Biosfera, ecología urbana y energías alternativas;

**Art. 413** “El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.” (ASAMBLEA CONSTITUTENTE DEL ECUADOR, 2008)

La empresa Aromas del Tungurahua con RUC: 1802859908001, creada por el Licenciado Efrén Silva y Doña Martha Tirado, tiene dos décadas en el mercado nacional, es una empresa dedicada al cultivo y procesamiento de plantas medicinales, frutas y vegetales para la elaboración de productos, como: fitofármacos, infusiones aromáticas y materia prima basado en procesos de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) ISO 22000. Tiene en sus líneas de producción varios molinos, uno de ellos se encarga de moler productos deshidratados previamente triturados para convertirlos en polvo y elaborar sobres para la preparación de infusiones aromáticas y/o medicinales, o entregarlo como materia prima a otras empresas.

En el proceso están involucrados varios elementos mecánicos y eléctricos, el molino de martillos (36 martillos) accionado por un motor de 30 kW, una tolva con capacidad aproximada de 100 kg con un motor pequeño que le provee la vibración necesaria para que el producto entre en el tornillo de transportación, un tornillo de transportación con un diámetro de 25 cm accionado por un motor de 3 kW que es controlado en su velocidad por un variador de frecuencia y un motorreductor, y de un sistema neumático que ayuda a la circulación del producto mediante su absorción.

De todos estos elementos tanto mecánicos como eléctricos, no se conoce si son utilizados en el punto óptimo de trabajo, lo cual puede provocar pérdidas económicas en especial si no se trabaja con la eficiencia adecuada.

No conocer los puntos de eficiencia energética, de todos estos elementos, puede producir graves pérdidas a la empresa, tanto de recursos, mano de obra y tiempo, lo cual puede influir en baja calidad, aumento de costos y podría disminuir la competitividad de la empresa.



Es por esto que la empresa Aromas del Tungurahua, desea mejorar sus procesos para elaborar sus productos con alta eficiencia y contribuir al ahorro energético tan necesario a nivel nacional y mundial.

## **JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La empresa Aromas de Tungurahua, tiene dentro de su sistema de producción una gran variedad de procesos, entre ellos: el cultivo de diferentes productos para utilizarlos como materia prima, deshidratación, molienda, empaquetado y distribución. Se preocupa por trabajar con procesos altamente eficientes, sin embargo está consciente que estos se pueden mejorar y aumentar su eficiencia.

Uno de los procesos consiste en moler los productos deshidratados en un molino de martillos, se han realizado pruebas para trabajar eficientemente, pero estas pruebas no son suficientemente técnicas y la eficiencia es buena pero no óptima.

La empresa Aromas del Tungurahua desea conocer cuál es el punto óptimo de trabajo del molino de martillos para moler una gran variedad de productos con la mayor eficiencia, también está consciente que en la actualidad el consumo de recursos energéticos es un problema grave, un claro ejemplo es la energía eléctrica, si se consume sin eficiencia representará a la larga grandes pérdidas y un aumento en sus costos.

Para disminuir el consumo de los recursos la mejor solución es aumentar la eficiencia en todos los sistemas que los demandan.

Por tanto es necesario que todos los procesos utilizados en la empresa Aromas del Tungurahua, lo hagan en su punto de máxima eficiencia o por lo menos muy cercano a él. Sin importar que el porcentaje de mejora sea pequeño, se debe aumentar la eficiencia energética, ya que de no hacerlo se continúa con un gasto innecesario de estos recursos y provoca que en el futuro sean demasiado costosos y difíciles de conseguir.

## **OBJETO Y PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **Objeto de estudio**

Proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos en la Industria Aromas de Tungurahua en la ciudad de Ambato.

### **Formulación del problema**

Es necesario determinar la velocidad óptima de alimentación del producto, en el proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos y su incidencia en la eficiencia energética, en la empresa Aromas de Tungurahua de la ciudad de Ambato, ya que su desconocimiento provoca que la eficiencia no sea la adecuada, se tiene un consumo en exceso de energía eléctrica y se pone en riesgo la efectividad y competitividad de la empresa.

## **CAMPO DE ACCIÓN Y OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN**

### **Campo de acción**

Automatización para lograr la eficiencia energética en el proceso de molienda de productos deshidratados.

### **Objetivo General**

Diagnosticar la eficiencia energética en el proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos, en la Industria Aromas de Tungurahua en la ciudad de Ambato para diseñar un sistema automatizado de control de velocidad de alimentación del producto

## **HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

El diagnóstico de la eficiencia energética en el proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos, en la Industria Aromas de Tungurahua en la ciudad de Ambato permitirá diseñar un sistema automatizado

de control de velocidad de alimentación del producto para trabajar en un punto óptimo de eficiencia energética.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Fundamentar científicamente la relación que existe entre la velocidad de alimentación de producto y la eficiencia en los procesos industriales de molienda.
- Realizar pruebas para determinar la velocidad óptima de alimentación del producto en el proceso de molienda, para varios productos.
- Diagnosticar el consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda.
- Cuantificar los beneficios producidos al trabajar con la velocidad óptima de alimentación de producto al molino de martillos en el proceso de molienda de productos deshidratados.
- Realizar la propuesta y la inversión necesaria para trabajar en el punto óptimo de producción y el tiempo en el cual se recuperará dicha inversión.

### **SISTEMAS DE TAREAS**

- Recopilar información en fuentes bibliográficas sobre el comportamiento de los procesos industriales de molienda.
- Analizar teóricamente la relación existente entre la velocidad de alimentación del producto al molino y su eficiencia.
- Determinar los parámetros que determinan el consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda de productos deshidratados.
- Realizar varias moliendas de un mismo producto con cantidad de producto constante, medir el tiempo que se demora, la cantidad de energía eléctrica que consume y la calidad del producto a la salida del molino.
- Identificar la velocidad de alimentación de producto que produce la máxima eficiencia energética con calidad de producto deseado.
- Determinar la mejora obtenida al trabajar con la velocidad óptima obtenida.
- Diseñar un sistema automático para el control de velocidad de alimentación del producto.

- Determinar la rentabilidad del sistema diseñado.
- Realizar la validación del diseño mediante simulación.

### **TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS**

- **La observación.**- Se observará el proceso actual para planificar sus mejoras. Su instrumento la guía de observación. Ver anexo A
- **La entrevista.**- Se realizarán entrevistas tanto a directivos, personal administrativo, operadores como a profesionales expertos en molienda, automatización y costos. Su instrumento la guía de entrevista. Ver anexo B
- **La medición.**- Se tomarán medidas a variables como la corriente del motor del molino, su potencia, velocidad de ingreso del producto, granulometría tanto a la entrada como a la salida. Sus instrumentos son de medición de variables tanto analógicas como digitales.
- **El modelado.**- Se modelará el sistema propuesto para realizar las pruebas de validación del sistema automático
- **La simulación.**- Mediante el uso de software especializado, se pondrá a prueba el sistema automatizado de control de velocidad de alimentación del producto.

### **VISIÓN EPISTEMOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN**

El trabajo pretende realizar varias pruebas, utilizar diferentes velocidades de la alimentación del producto hacia el molino de martillos, para una misma cantidad de producto, medir el tiempo que se demora en moler, la corriente de consumo del molino, la granulometría del producto a la salida, y determinar la velocidad a la cual se tiene el mayor beneficio. Se relacionan causa-efecto y se utiliza repetición de eventos.

Para ello se utiliza el enfoque **Empirista-Inductivo**, que consta de:

**Método de hallazgo: Inductivo.**- Ya que se trata de análisis, donde al medir cada parámetro que influencia en la molienda, nos permite determinar un sistema para mejorar la calidad del producto y disminuir costos.

**Método de contrastación: Experimental.-** Pues para determinar los parámetros adecuados en la molienda de productos secos, se debe experimentar un gran número de veces.

Una vez determinado el punto de trabajo óptimo, es decir la velocidad de alimentación del producto adecuada, se procede a diseñar un sistema automático, que permita seleccionar la velocidad tomando en cuenta el producto a moler y la mantenga constantemente durante todo el proceso de molienda.

Al tratarse de diseño en este caso el enfoque que se utiliza es el **Racionalista-deductivo** el cual consta de:

**Método de hallazgo: Deductivo.-** Debido a que procedemos de una necesidad general para definir los subsistemas particulares que permitirán desarrollar el proceso automático de molienda que cumpla con los objetivos.

**Método de contrastación: Experimental.-** Pues para determinar el correcto funcionamiento del automatismo, se debe experimentar un gran número de veces, en este caso al tratarse de diseño los experimentos se realizaran con la ayuda de simuladores.

## **ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

Para desarrollar el presente trabajo se analizan los elementos tanto mecánicos como eléctricos ya que estos al no trabajar en su punto óptimo de eficiencia manteniendo la calidad del producto, pueden afectar tanto en disminución de la cantidad producida del producto, mayor tiempo de producción, aumento del consumo de recursos: energía eléctrica, mano de obra, tiempo, entre otros.

Se pretende realizar un estudio para encontrar la velocidad de alimentación de materia prima al molino que permita obtener la eficiencia óptima, en el proceso de molienda de productos deshidratados y diseñar un sistema que permita de forma automática seleccionar y controlar la velocidad de alimentación del producto en dependencia de las características de molienda de cada producto, para trabajar en el punto de eficiencia óptima.

## **DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

El presente trabajo tiene como propósito caracterizar, el sistema de molienda de productos deshidratados mediante el uso de un molino de martillos en la Industria Aromas del Tungurahua de la ciudad de Ambato. Determinar mediante pruebas, cuál es la velocidad de alimentación de producto al molino que permita el mayor beneficio y diseñar un sistema automático que mantenga la velocidad en el valor deseado.

Al inicio de este trabajo, se analiza el problema de investigación, se realiza la contextualización a niveles macro, meso y micro; se determina el objeto y campo de la investigación, la justificación y se enuncian los objetivos.

En el Capítulo 1, se caracteriza el objeto de la investigación en su contexto total, se presenta el marco teórico sobre los principales aspectos como molienda, molinos, eficiencia energética, y automatismos. Los antecedentes investigativos señalando sus principales conclusiones las cuales apoyan y ayudan a este trabajo de investigación.

En el Capítulo 2, se presenta la metodología para realizar la investigación, la caracterización del sistema a analizar, se diseñan los experimentos, se determina qué parámetros se medirán, los indicadores relevantes, las técnicas usadas, los instrumentos utilizados, el procedimiento para ejecutar y validar el proyecto de investigación.

En el Capítulo 3, se presentan los resultados y el análisis de los datos obtenidos por los instrumentos aplicados a través de tablas y gráficos estadísticos generados a partir de la información recolectada y tabulada.

En el Capítulo 4, se presenta la propuesta, el diseño de un sistema automático que permita seleccionar y mantener la velocidad de alimentación del producto al

molino, manteniendo la eficiencia óptima, en base a los resultados obtenidos en el trabajo de investigación desarrollado.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones relevantes.

## **CAPÍTULO I**

### **1. EL MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO**

El presente trabajo busca mejorar la eficiencia energética en el proceso de molienda de productos deshidratados que se producen en la empresa Aromas de Tungurahua de la ciudad de Ambato, contribuir a la disminución de gastos innecesarios, a la disminución del consumo de portadores energéticos, a las políticas de estado tanto en el ámbito energético como social y ambiental.

Para el efecto se pretende buscar la velocidad de alimentación de productos deshidratados al molino de martillos que permita obtener la máxima eficiencia posible, principalmente en consumo de energía eléctrica.

#### **1.1. Caracterización detallada del objeto de investigación.**

El objeto de investigación de este proyecto es el proceso de molienda de productos deshidratados utilizando un molino de martillos.

##### **1.1.1. Descripción del objeto**

El proceso de molienda de productos deshidratados tiene un sistema de alimentación de materia prima al molino, que consiste en una tolva con capacidad aproximada de 100 kg, un tornillo sin fin de 25 cm de diámetro y 1,5 m de longitud, movido por un motor de 3 kW controlado por un variador de frecuencia de 5 kw. Un molino de 36 martillos, con un motor de 30 kW y una capacidad de molienda de hasta 1 tonelada diaria.

##### **1.1.2. Delimitación espacio-temporal**

Diagnóstico de la eficiencia energética en el proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos, en la Industria Aromas de Tungurahua en la ciudad de Ambato durante los meses de octubre del 2014 a agosto del 2015. Diseño de un sistema automatizado de control de velocidad para la alimentación del producto.



## 1.2. El marco teórico

### 1.2.1. Argumentación acerca de la necesidad de la investigación.

**Económica:** Toda empresa para ser competitiva en el mercado comercial debe tener precios inferiores a los de sus competidores, si no se cuida en los gastos y no mejora la eficiencia en sus procesos los gastos serían mayores aumentando los precios y disminuyendo su competitividad.

Sin ser el propósito fundamental de este trabajo de investigación, contribuirá a disminuir los gastos que por falta de eficiencia se dan en el proceso de molienda de productos deshidratados.

**Legal:** La industria Aromas de Tungurahua nace dos décadas atrás el 01 de agosto del 1996, fundada por el Licenciado Efrén Silva y Doña Martha Tirado con el RUC 1800475780001 y a nombre de Silva Enríquez Efrén Forni, luego del fallecimiento de los fundadores, el 15 de junio del 2006, la empresa pasa a ser dirigida por sus hijos con el RUC 1802859908001 a nombre de Silva Tirado Efrén Xavier. Ver Anexo C

“En Ecuador el Ministerio del Medio Ambiente, bajo su estructura organizacional, en la Dirección Nacional de Control y Prevención de la Contaminación se encuentra como una de sus funciones la gestión de la producción más limpia. El proceso producción más limpia en el Ministerio, tiene respaldo jurídico en la Constitución del Estado, en la Ley de Gestión Ambiental, en la Ley de Ciencia y Tecnología y sobre todo su respaldo se fundamenta en los principios emitidos en la Cumbre de Río 1992 para la consecución del desarrollo sostenible”. (ALFATECLIMIN, 2007)

Acuerdos Internacionales relacionados con la producción más limpia PML y la Gestión Ambiental Empresarial GAE.

Declaración de Río (Cumbre de la tierra 1992). Agenda 21. Carta de la Cámara Internacional de Comercio.

Principio 9: Los Estados deberán colaborar en el fortalecimiento de su propia capacidad de lograr el desarrollo sostenible, aumentando el saber científico

mediante el intercambio del conocimiento científico y tecnológico e intensificando el desarrollo, la adaptación, la difusión y la transferencia de tecnologías nuevas e innovadoras.

Capítulo 34: Transferencia tecnológica para desarrollar la sostenibilidad, todos los países necesitan tener acceso y entrenamiento en el uso de tecnologías que sean limpias y utilizar pocos recursos. Las tecnologías ambientalmente sanas incluyen no solo el hardware sino el know-how (saber cómo), los servicios, el equipo, las habilidades organizacionales y gerenciales para realizar el trabajo.

Numeral 13: Transferencia de tecnología para contribuir en la transferencia de tecnologías ambientalmente sanas y métodos de gestión, a través de los sectores públicos y privados (Industriales).

**Social:** Al mejorar los precios en los productos de cualquier empresa o industria, disminuir la contaminación, conservar los recursos, se contribuye al bienestar de la población, lo cual constituye un gran aporte social. Una automatización disminuye en gran parte el trabajo tedioso al operador, en este caso el proceso está a cargo de dos operadores quienes se ven beneficiados con disminución de trabajo en un ambiente con mucho polvo del propio producto.

**Medioambiental:** Al aumentar la eficiencia energética, se disminuye el consumo de los portadores energéticos que en la actualidad son mayormente no renovables y contaminan el medio ambiente, por tanto este trabajo contribuye a la disminución de emanaciones dañinas para el medioambiente. El residuo del producto también disminuye lo cual repercute en menor contaminante de polvo del producto.

### **1.2.2. Antecedentes de estudio**

El presente trabajo consiste en buscar una alternativa para mejorar la eficiencia en la molienda de productos deshidratados, mediante la implementación de un sistema automático de control de velocidad de alimentación de producto.

Los antecedentes que servirán de ayuda son los siguientes:

En la tesis “Estudio para la creación de una fábrica de alimentos balanceados, ubicada en la parroquia de Pifo, provincia de Pichincha”, (2010), el autor, Ricardo Arturo Tapia Villacrés emplea el método analítico, para determinar que el análisis de los diferentes indicadores económicos y financieros permite identificar cuándo un proyecto es rentable para el inversionista.

En el trabajo “Diseño de un modelo de gestión estratégico para el mejoramiento de la productividad y calidad aplicado a una planta procesadora de alimentos balanceados”, (2012), los autores: Verni Pinales Rizzo y Juan Carlos Tamayo Vargas, al aplicar el método analítico en su investigación, concluyen en uno de sus puntos que la gestión en una empresa busca mejorar la eficiencia aplicando programas de operación, control, mantenimiento y mejoramiento de los procesos.

En la tesis “Estudio para la creación de una fábrica de balanceados en la parroquia el Ingenio del cantón Marcabelí”, (2012), el autor Héctor Medardo Armijos Nagua, luego de utilizar el método práctica de campo, analiza la utilización de tornillos dosificadores y la necesidad de automatizarlos con el fin de mejorar la eficiencia en la producción de balanceado, y recomienda que las empresas trabajen de manera técnica en la búsqueda no solo de productos de calidad si también producirlos con la mayor eficiencia posible.

En el trabajo “Rediseño y automatización de la máquina peletizadora para la planta de balanceados Espejo”, (2012), la autora Erika Magalí Granda Chuquin dentro de sus conclusiones recalca que la carencia de un sistema de control en línea ocasiona: utilización innecesaria de recursos humanos y energéticos, aumenta las pérdidas, es decir afecta la eficiencia de los procesos.

En el artículo “Eficiencia energética y medio ambiente”, (2009), el autor Pedro Linares Llamas, indica claramente que el ahorro y la eficiencia energética contribuyen a la disminución de las emanaciones y por ende al cuidado del medioambiente, lo que también repercute en el mejoramiento de la calidad de vida de las personas.

En el proyecto “Montaje de una fábrica de producción de alimento balanceado para Avícola Santa Lucia utilizando un sistema HMI”, (2008), el autor Álvaro

Mauricio Sánchez Mayorga utilizando el método experimental, menciona la importancia de los elementos eléctricos y electrónicos en la realización de un proyecto que en este caso coincide con la molienda de productos para obtener balanceado para uso animal.

En el artículo “*Automated mil control using vibration signal processing, IEEE*”, (2007), los autores Karl S. Gugel Ph.D., y el Ing. Rodney M. Moon II, concluyen que automatizar un molino para obtener la menor cantidad de consumo en kW por unidad de producción, ayuda a disminuir no solo el consumo energético sino también ahorrar las horas de producción.

### **1.2.3. Fundamentación teórica**

El presente trabajo consiste en aumentar la eficiencia en la molienda de productos deshidratados que utiliza un molino de martillos, al cual le llega el producto a través de un tornillo sinfín.

El molino de martillos como cualquier molino puede estar con poca o mucha carga, lo cual provoca un exceso ya sea de tiempo o energía eléctrica utilizados en el proceso, respectivamente. Existe un punto de trabajo donde la cantidad de material ingresada al molino es la adecuada para conseguir tanto tiempo como consumo de energía de manera óptima.

Se pretende identificar este punto de alimentación de producto de máxima eficiencia y automatizar la velocidad del tornillo que alimenta al molino de martillos de tal manera que este punto pueda ser seleccionado por el usuario dependiendo del producto a moler y se mantenga durante todo el proceso, asegurando la calidad y gasto adecuados.

Es necesario por tanto conocer sobre los procesos de molienda con molinos de martillos, así como la manera de automatizar dichos procesos.

### 1.2.3.1. Proceso de molienda

La molienda es un proceso que permite la reducción de tamaño de diferentes tipos de productos o materiales, estos pueden ser: rocas, minerales, cereales, hojas secas, entre otros. Este proceso se diferencia de la trituración porque el diámetro de las partículas obtenidas es menor que 2,54 cm, cuando el producto es un polvo fino se conoce como molienda fina.

Existen diferentes tipos de molienda por ejemplo se pueden considerar: (GUAJARDO, 2012)

- La mena de una cantera para separar sus componentes.
- En la fabricación de arcillas y cementos.
- Para preparar combustibles sólidos pulverizados.
- Fabricación de harinas.
- En la molienda de frutos secos.
- Otros usos.

En tales procesos se pueden utilizar dos tipos de molienda:

- La molienda húmeda que se realiza a suspensión de sólidos en un líquido.
- La molienda seca.

La molienda de productos alimenticios, como cereales y polvos de frutos y hojas secas, se realizan con la utilización de la molienda seca donde para la obtención de su aroma o esencia, se hace necesaria la deshidratación. Este proceso seco es favorable para su almacenamiento y su transportación, aunque tiene algunos inconvenientes como la pérdida de proteínas lo cual afecta la calidad del producto. (ACUÑA, 2009).

Las características principales de estos tipos de moliendas son:

#### **Molienda húmeda**

- Requiere menos potencia por tonelada entrada
- No requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos
- Consume más revestimiento (por corrosión)

## **Molienda seca**

- Requiere más potencia por tonelada entrada
- Si requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos
- Consume menos revestimiento (por corrosión)

### **1.2.3.2. Características de los molinos**

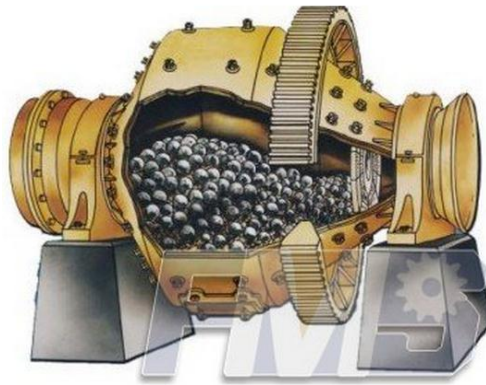
Para realizar la molienda es necesario la utilización de una máquina denominada molino, la Real Academia de la Lengua Española lo define como: “*Artefacto con que, por un procedimiento determinado, se quebranta, machaca, lamina o estruja algo*”, existen diferentes tipos de molinos, utilizados en las industrias: los de bolas (más usados en minería), los de rodillos y los de martillos (ambos usados en industria alimenticia), el de martillos es el más utilizado.

Además los molinos pueden funcionar con diferentes tipos de energías, existen los de viento que funciona con la fuerza proporcionada por el viento al hacer girar grandes aspas, los de agua que funcionan con la fuerza del agua que hace girar una turbina, antiguamente se usaban los de sangre que funcionaban con fuerza animal, y actualmente son usuales aquellos que funcionan con un motor accionado por energía eléctrica.

### **Molino de bolas**

El molino de bolas generalmente están formados por un compartimiento de forma cilíndrica o cónica, que gira sobre un eje horizontal, dentro de este compartimiento se cargan con bolas que pueden ser de acero, pedernal o porcelana, generalmente estas bolas ocupan cerca de la mitad del compartimiento.

Figura 1.



**Figura 1 Molino de bolas**

**Fuente:** (MACHINERY FORMATS CONSTRUCTION, 2014)

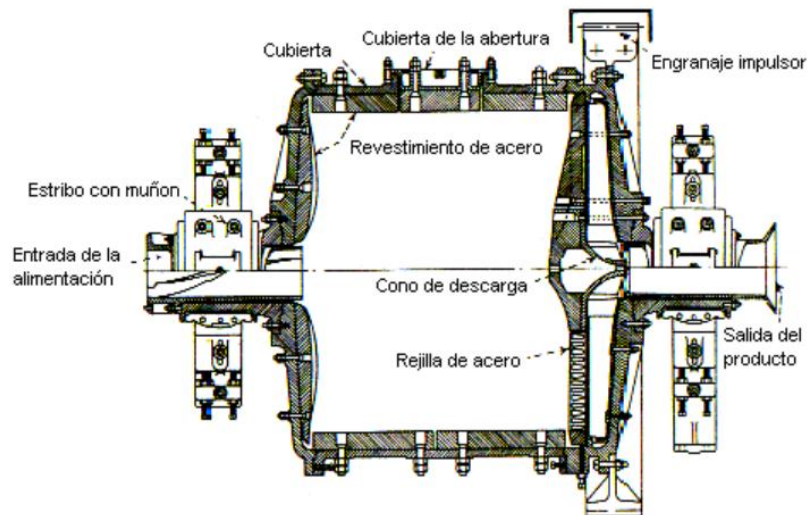
Las bolas al rotar en el compartimiento, son levantadas y caen chocando unas con otras aplastando el material a moler, también la fricción entre las bolas y el material contribuyen a la molienda, la reducción de tamaño del material molido en este tipo de molinos varía desde 20 a 1 hasta 200 a 1. El tamaño más grande de las bolas usualmente es de 13 cm. (ALCANTARÁ, 2008).

Los molinos de bolas tienen la ventaja que permiten pulverizar el material de manera más fina que otros molinos, ya que las bolas presentan más superficie de contacto con el material.

Los molinos de bolas generalmente suelen ser de trabajo continuo, donde la alimentación se realiza por un extremo y la descarga se realiza por el otro extremo, el producto puede descargarse cuando rebosa uno de los cojinetes el cual es hueco, las partículas más pequeñas pueden ser arrastradas con la ayuda de un fluido circulante, que puede ser aire o agua. (MACHINERY FORMATS CONSTRUCTION, 2014), ver Figura 2

Los molinos de bolas, tienen muchas aplicaciones entre las relevantes se encuentran en:

- Fábricas de cemento
- En la construcción
- En la fabricación de materiales refractarios
- En la industria de fertilizantes químicos
- En la minería (QUIMINET, 2014)



**Figura 2 Molino de bolas continuo, tipo rejilla, marca Darcy**

**Fuente:** (ALCANTARÁ, 2008)

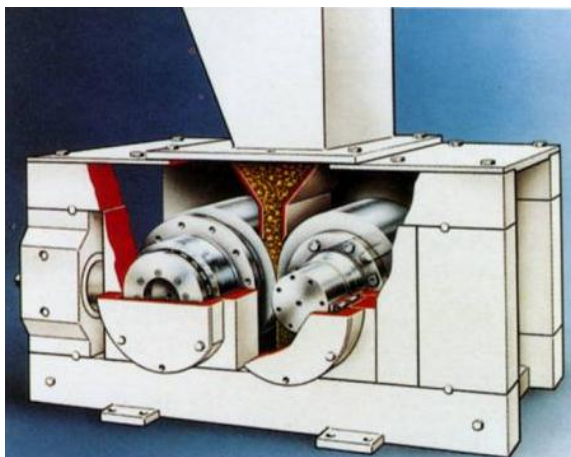
### **Molino de rodillos**

Los molinos de rodillos generalmente están formados por dos cilindros que giran en direcciones contrarias, entre los cilindros se coloca la carga, donde es atrapada y arrastrada, en algunos casos los rodillos giran a diferentes velocidades dando lugar a que aparezcan fuerzas de cizalla. Figura 3. Estos molinos pueden estar contruidos con rodillos de diferentes longitudes y diámetros, y trabajar a diferentes velocidades, dependiendo de su uso, generalmente las velocidades pueden ir desde 50 a 300 rev/min., y su relación de reducción son pequeñas, en general inferiores a 5.

Otra característica que presentan es que se puede variar el espacio entre los rodillos para adaptarlos al tamaño del producto a moler, aunque dispone de resortes que separan los rodillos cuando existe algún exceso de carga o cuerpo extraño. (BALCAZAR & GUAMBA, 2009)

Los molinos de rodillo pueden ahorrar hasta un 30% de energía y aumentar un 50 % en la producción, con un desgaste reducido, una vida útil de 10 a 20 veces, y generan poco ruido comparado con un molino de bolas. Es por ello que se destacan por su eficiencia en el consumo de energía y en obtención uniforme del tamaño de partículas. (INTEREMPRESAS, 2014)





**Figura 3 Molino de rodillos de alta compresión, marca Alpine**

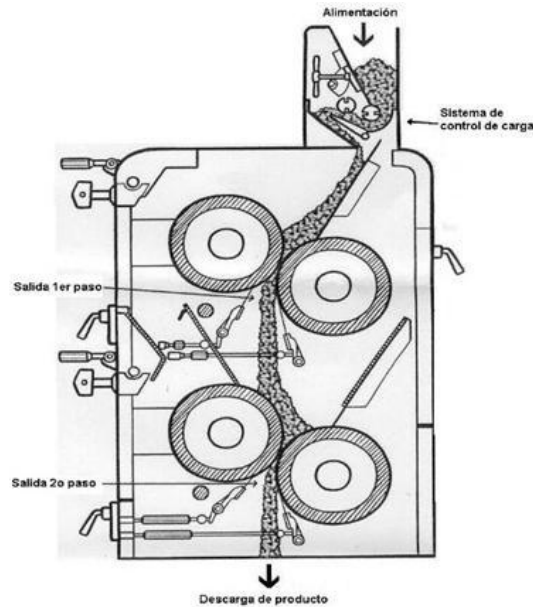
**Fuente:** (INTEREMPRESAS, 2014)

En algunos casos se pueden tener rodillos de varios pasos, lo cual aumenta el grado de reducción del producto. Además los rodillos no siempre son lisos, pueden tener dientes o ser en forma de espiral con acanaladuras que permiten romper fácilmente los granos. Figura 4.

### **Usos y aplicaciones de los molinos de rodillo**

Los molinos de rodillo, tienen una variedad de usos en todo tipo de industrias, por ejemplo:

- En agricultura
- Para molienda de granos
- En la minería
- En construcción
- En pavimentación
- En la producción de productos alimenticios. (JOHNSON, 2014)



**Figura 4 Molino de rodillo de doble paso**

**Fuente:** (VEGA, 2004)

### **Molino de martillos**

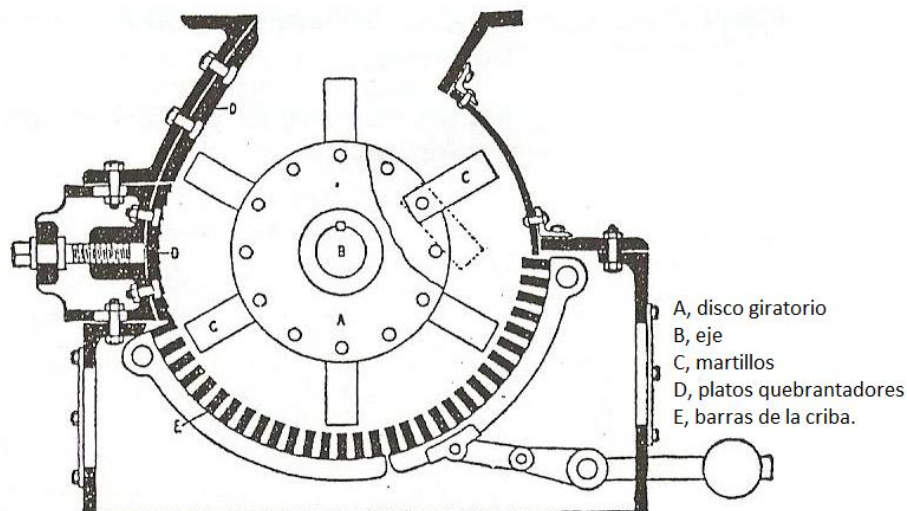
Existe un molino con características adecuadas para la industria de alimentos, en la producción de harinas y también para la producción de polvos provenientes de frutos u hojas secas, por ejemplo para la producción de té aromáticos y/o medicinales con diferentes aromas y sabores. Este molino a diferencia del molino de rodillos no es tan eficiente ni produce partículas muy finas, pero es una alternativa de bajo costo en especial para empresa pequeña y de economía limitada.

Este tipo de molino es utilizado en muchos países para la industria alimenticia y producción de harinas, por ejemplo en cuba se está invirtiendo en la instalación de molinos de martillo para la producción de polvos y de harinas integrales y su posterior almacenamiento, (PINO, 2010). (CASTILLO & FALCO, 2011), (GONZÁLES, MARTÑINEZ, & REYES, 2010)

Los molinos de martillos son usados en la industria alimenticia por su gran versatilidad, tamaño pequeño, peso ligero, silenciosos, de fácil mantenimiento y costo bajo, comparado con otros tipos de molinos.

Tienen la característica de que pueden variar la capacidad de alimentación en dependencia de su tamaño desde cientos de kg/h, hasta ton/h, son usados para la molienda de granos secos, en la empresa Aromas Del Tungurahua se emplean en la trituración de hojas de plantas medicinales y frutos secos como papaya, manzana, piña y otras más, utilizados en la fabricación de aguas medicinales y aromáticas.

La capacidad de molienda de este tipo de molino, está en los elementos de golpe llamados martillos, que son elementos de diferentes formas (T, anillos o estribos), que giran acoplados a un eje, los martillos al girar golpean el material y producen su molienda, la finura del material obtenido depende del espacio dado entre el radio de los martillos y la placa de molienda, la cual consiste de una rejilla o zaranda con orificios del tamaño específico de acuerdo a los requerimientos, que mantienen al grano dentro de la cámara de molienda, hasta que el material adquiera la finura deseada. Ver figura 5. (PAVÓN, 2013)



**Figura 5** Esquema de la cámara de un molino de martillos

**Fuente:** (PAVÓN, 2013)

Otro factor para la finura del producto, es la velocidad con la que el eje impulsor hace girar los martillos, la alta velocidad de giro de los martillos produce la energía cinética que al disiparse en el material provoca que el material se fragmente.

Los molinos de martillos presentan las siguientes características:

**Ventajas:**

- Simplicidad, durabilidad y versatilidad
- Muele cualquier tipo de granos.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Mantiene su eficiencia original a través del tiempo.
- Puede moler granos con alto porcentaje de humedad
- Mayor homogeneidad en la molienda
- Se puede moler ingredientes mezclados

**Desventajas:**

- No puede producir un molido uniforme.
- Requerimientos altos de potencia.
- Menor eficiencia en la utilización de energía.
- Elevación de temperatura.
- Mayores pérdidas por humedad.
- Mayor costo de mantenimiento (ESTRELA & FONSECA, 2009)

**Usos y aplicaciones de los molinos de martillos**

Los molinos de martillos, tienen una variedad de usos en todo tipo de industrias, por ejemplo:

- En plantas químicas
- Producción de aglomerado
- En la molienda de carbón.
- En la molienda de granos y productos secos
- En la industria del reciclado; Molienda de plásticos, cartón, cáscaras.
- En la agricultura; producción de fertilizantes (RADER, 2014)

A continuación se puede observar el molino utilizado en la empresa Aromas del Tungurahua. Figuras 6 y 7.



**Figura 6 Molino de martillos de la empresa Aromas del Tungurahua**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**



**Figura 7 Martillos del molino de frutos y hojas secas de la empresa Aromas del Tungurahua**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

### **1.2.3.3. Eficiencia energética**

El Consejo Mundial de Energía define: “Eficiencia Energética se refiere a la implementación de cambios, mejoras, modificaciones, etc. En los procesos, actividades u operaciones, que lleven consigo la intención de propiciar ahorro energético o una mayor eficiencia” (RIVERA, 2009)

La energía es una necesidad básica para los seres humanos, requiere de la energía tanto para su propio desenvolvimiento como para hacer funcionar grandes

maquinarias y procesos. Es necesaria para casi todo bien o servicio, y es responsable de la economía mundial. Es utilizada en todos los sectores como, transporte, las industrias y el comercio.

Al aumentar el consumo de los bienes y servicios también se incrementa el consumo de energía, en general en el mundo existe una brecha entre la oferta y la demanda de aproximadamente un 11.35%. Para disminuir la brecha y encontrar solución al problema de la demanda energética existen dos principales posibles soluciones: (KULKARNI, 2013).

1. **Que se aumente la capacidad de generación:** Lo cual se consigue al aumentar el número de instalaciones generadoras, esto representa: planificación, utilización de grandes espacios, costos y tiempo.
2. **Reducir el consumo de energía:** Pero como no se puede reducir la demanda de los bienes y servicios, lo que se debe buscar, es utilizar la eficiencia en el uso de la energía.

La eficiencia en la utilización de la energía, se puede conseguir de dos maneras, la primera es cara y fácil de implementar, ésta consiste en la aplicación de nuevas tecnologías que hacen que los equipos consuman menos energía entregando las mismas prestaciones (por ejemplo la utilización de motores de alta eficiencia) y la manera barata pero difícil de implementar, consiste en lograr cambios de hábitos en quienes consumen la energía. (CAMPOS, 2009)

La eficiencia energética busca la disminución del consumo de energía por dos razones muy importantes, el uso razonable de energía que permita que esta sea útil por mayor tiempo y la disminución de desechos y/o emisiones que afectan el medio ambiente y afectan el entorno donde vivimos, afectando la calidad de vida. El organismo Naciones Unidas por ejemplo solicita que exista una reducción de las emanaciones principalmente de CO<sub>2</sub>, el grupo de países del G8 que son Rusia, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Alemania, Reino Unido y Japón, piden que se reduzca hasta el 2025, en un 50% las emanaciones de gases invernaderos para evitar las consecuencias más graves del cambio climático.

Para cumplir esta meta se requiere un cambio, en: cómo se produce, se entrega y consume la energía. Para ello se requiere el compromiso de los niveles gerenciales de las empresas y de la gente común que consumimos la energía.

De reducir el consumo de energía, se tendrán varios beneficios, entre ellos: mejoras en la productividad y competitividad, disminución en el impacto ambiental e incluso mejoras en los servicios.

Existen varias maneras de aumentar la eficiencia energética en las industrias, entre las técnicas a utilizar se encuentra el uso de:

- Motores de alta eficiencia.
- Arrancadores suaves.
- Transformadores de alta eficiencia.
- Banco de capacitores.
- Balastos electrónicos.
- Sensores de presencia.
- Control de iluminación eficiente.
- Lámparas ahorradoras.
- Filtro de armónicos.( (MAHESWARAN, RANGARAJ, JEMBU, & ADITHYA, 2012).

Si además se combina el uso de técnicas eficientes anteriormente mencionadas en el uso de la automatización, el resultado será un mayor ahorro, en especial cuando la automatización permitirá alcanzar una máxima eficiencia en los procesos y en las maquinarias.

#### **1.2.3.4. Caracterización energética**

Según (CAMPOS, 2009), es el primer paso para alcanzar la eficiencia energética es la caracterización de la energía.

*“La caracterización energética es un procedimiento de análisis cualitativo y cuantitativo que permite evaluar la eficiencia con que la empresa administra y usa todos los tipos de energía requeridos en su proceso productivo. También es el*

*paso previo para implementar un sistema de gestión o administración de la energía”.* (CAMPOS, 2009).

La caracterización energética permite conocer la información necesaria para realizar una gestión correcta con miras de alcanzar la eficiencia en el uso de la energía. Dentro de estas se pueden citar:

- \* **Mediante procedimientos cualitativos.** - Las debilidades que posee la empresa en la planificación, compra, almacenamiento, transformación, distribución, control y uso final de la energía, es decir las debilidades del sistema de administración de la energía que tiene la empresa.
- \* **Mediante procedimientos cuantitativos.-** Niveles de pérdidas, los lugares donde se producen las pérdidas, los lugares potenciales donde se puede aumentar la eficiencia, identificar los índices de eficiencia, lasas de reducción de pérdidas.

#### **1.2.3.5. Indicadores de eficiencia energética**

Para todo tipo de análisis, caracterización y gestión se debe tener claro cuáles son los principales indicadores energéticos que se deben analizar.

Fernández 2009. Los indicadores son parámetros de medición que integran generalmente más de una variable básica que caracteriza un evento, a través de formulaciones matemáticas sencillas, permitiendo una fácil comprensión de las causas comportamiento y resultados de una actividad, los indicadores, en general, son muy valiosos para registrar, interpretar y analizar periódicamente los consumos energéticos. Y el estudio de sus comportamientos históricos es el que permite descubrir las oportunidades de mejora. (p.13)

Los indicadores energéticos para ser útiles deberán ser, relevantes, dar información por períodos, confiables, medibles, que se puedan analizar, evaluar y comparar con valores metas. Deben permitir cuantificar como se usa la energía, en el campo de interés sea este empresarial o doméstico.



Se pueden mencionar dos macro grupos de indicadores energéticos:

1. Los económicos que miden la eficiencia energética considerando la totalidad de la economía de un sector.
2. Los técnico-económicos, se toman de un subsector y se lo hace relacionando el consumo energético con un indicador de actividad, por ejemplo la producción de un producto, o servicio. A estos indicadores también se los llama de consumo unitario.

Por ejemplo indicadores técnico-económicos podrían ser: La energía consumida comparada con el Producto interno bruto de un país (GJ/PIB), o la cantidad de energía utilizada en producir algo (kWh/unidades de producción). (FERNANDEZ, 2009).

Otros ejemplos de indicadores de eficiencia energética se mencionan en la tabla 1.

Tabla 1 Indicadores de eficiencia energética

| INDICADOR   | RELACIÓN  | UNIDAD   |
|---|---|--|
| <b>Intensidad energética bruta total</b>                                | Oferta interna bruta total / PIB                | Tep/USD  |
| <b>Eficiencia del abastecimiento energético</b>                         | Consumo neto total / Oferta interna bruta total | %  |
| <b>Consumo residencial de energía por habitante</b>                     | Consumo residencial de energía / población      | Tep/habitante                                  |
| <b>Recursos presupuestarios</b>   |   | % del presupuesto de la institución energética |
| <b>Recursos humanos disponibles</b>                                     |   | % con formación o experiencia para actuar      |
| <b>Emisiones evitadas debido al incremento de eficiencia energética</b> |   | ton CO <sub>2</sub> /año                       |

Fuente: (GARCETE, 2014)

### **1.2.3.6. Gestión energética**

“La gestión energética se define como un estudio integro que analiza la situación actual del consumo energético e implanta sistemas de control de la energía. Simultáneamente, busca alternativas en fuentes de energías renovables y la protección medioambiental, tanto en el diseño del proyecto como en la ejecución y coordinación de las instalaciones. Debe contribuir a fijar los objetivos a corto, medio y largo plazo para conseguir la optimización de los recursos energéticos, así como establecer las medidas, acciones y modificaciones que permitan reducir el consumo de energía.” (FNERGIA, 2015)

La gestión energética, es el conjunto de acciones u operaciones que se deben realizar de una manera organizada para conseguir el máximo beneficio al utilizar cualquier tipo de energía y para cualquier uso que se le dé, debe ser diseñada para lograr un uso eficiente de los portadores energéticos que una empresa requiere, sin disminuir las prestaciones.

Debe entenderse que el fin de una gestión energética es el ahorro energético, aunque casi en la totalidad de casos contribuye a la disminución de costos en el uso de la energía.

La función de la gestión energética se puede definir también como el estudio integral que analiza la situación actual del consumo de las fuentes de energía y plantea e implanta sistemas de control para un uso eficiente de dichas energías.

Los objetivos de una gestión energética son:

- Evaluar el cumplimiento de todos los requisitos legales relativo a los aspectos energéticos.
- Buscar las áreas donde se puedan mejorar la eficiencia energética.
- Supervisar y mejorar el mantenimiento de los equipos, maquinarias e instalaciones.
- Optimizar la calidad de los portadores energéticos utilizados.

- Mantener o incluso aumentar la producción, mientras se disminuye el uso de los portadores energéticos.
- Empezar por conseguir ahorro de energía, donde la inversión sea poca o nula.
- Conseguir ahorro de energía con inversiones rentables, es decir aquellas que demuestren un período de recuperación razonable.
- Desarrollar y supervisar programas continuos de mejoras. (JARAMILLO, 2006), (FNERGIA, 2015).

Todos estos objetivos deberán estar enfocados en los siguientes parámetros:

- Hábitos de consumo
- Equipos de calefacción y climatización
- Equipos eléctricos
- Equipos de iluminación
- Aislamiento térmico de la instalación. ( (AEDHE, 2011)

Las funciones que permiten alcanzar los objetivos de una gestión energética son:

Aprovisionamiento: Elección de fuentes de energía, negociación con proveedores y control de suministros, almacenamiento y distribución.

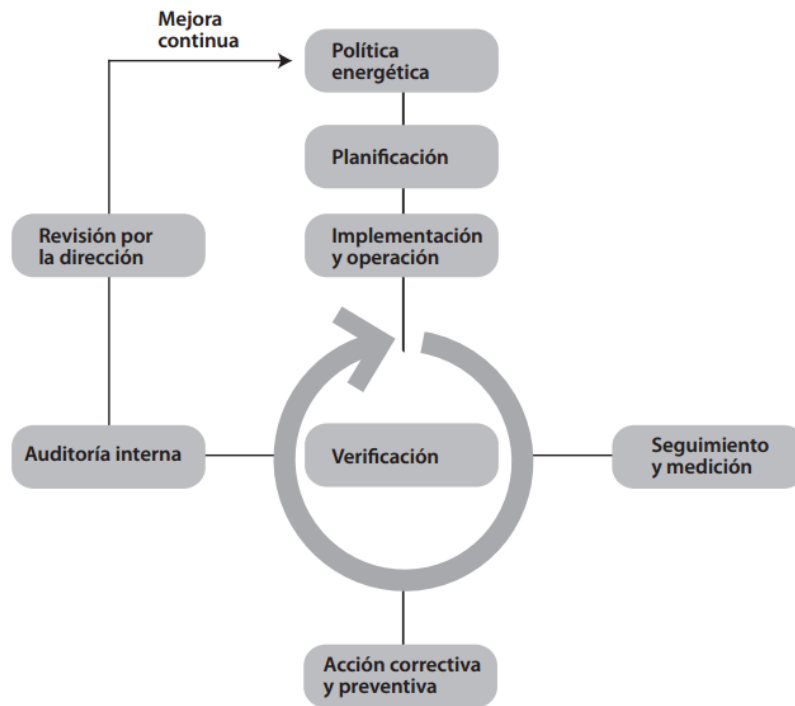
Análisis energético: Saber qué, cómo, donde y cuando se consume la energía.

Programa de ahorro de energía: Establecer un amplio plan de ahorro, empezando por aquellos procedimientos que demanden poca inversión. (JARAMILLO, 2006).

El ciclo básico de una gestión energética (ver figura8), tiene los siguientes componentes:

- Establecimiento de la política energética de la entidad: ¿Qué objetivos tenemos / qué queremos hacer en materia de uso de energía?
- Mejora continua mediante:
  - Planificación: ¿qué vamos a hacer y en qué plazo?

- Implementación de medidas: hagámoslo
- Verificación: examen para comprobar si funcionan las medidas
- Revisión por la dirección: a la vista de resultados se decide qué incluir nuevamente en planificación.



**Figura 8 Ciclo básico de una gestión energética**

**Fuente:** (AEDHE, 2011)

### **1.2.3.7. Auditoría energética**

Una herramienta necesaria para la implementación correcta de un sistema de gestión energética es la auditoría energética. Se considera como el punto de partida para el desarrollo de un sistema de gestión energética.

La auditoría energética consiste en la evaluación objetiva de una empresa con el objeto de:

- Obtener un conocimiento fiable del consumo energético y su coste asociado.
- Identificar y caracterizar los factores que afectan al consumo de energía.

- Detectar y evaluar las distintas oportunidades de ahorro, mejora de la eficiencia y diversificación de energía y su repercusión en coste energético y de mantenimiento, así como otros beneficios y costes asociados.

Los pasos para realizar una auditoría energética son:

- Estudio inicial.
- Medición y recogida de datos.
- Análisis y propuesta de mejoras. (AEDHE, 2011).

### **1.2.3.8. Diseño de un sistema de gestión energética**

Una vez analizados todos estos puntos el sistema de gestión energética, según la “Guía práctica para la implantación de sistemas de gestión energética SGE” publicado en el 2011 por la Asociación de Empresarios de Henares y la Fundación MAPFRE, se debe diseñar tomando en cuenta: (AEDHE, 2011)

#### ***Quienes deben implicarse en el diseño e implementación:***

- *Alta dirección de la empresa o entidad*
- *Encargado del SGE (puede ser un consultor externo)*
- *Dpto. Jurídico*
- *Gerencia / Dpto. Financiero*
- *Comunicación / Marketing*
- *Recursos Humanos / Formación*
- *Administración / Compras*
- *Ingeniería / Dpto. Técnico*

#### ***Planificación***

- *Uso pasado y presente de la energía*
- *Identificación de actividades, equipos y sistemas con impacto significativo*
- *Identificación de personas/funciones de la organización cuyo trabajo puede influir en el desempeño energético*

- *Identificación de las oportunidades de mejora*
- *Fuentes de energía utilizadas y potencial de uso de energías renovables o excedentes.*
- *Seguridad y calidad del aprovisionamiento energético*
- *Identificación de requisitos legales*
- *Establecimiento de objetivos, metas y programas energéticos*
  - *Concretos y medibles*
  - *Con asignación de responsabilidades*
  - *Con plazos definidos*

### ***Implementación y operación***

- *Definición de funciones, responsabilidades y autoridad, y asignación de los recursos necesarios.*
- *Formación y concienciación del personal en la política energética y el impacto de sus actividades.*
- *Establecimiento de procedimientos de comunicación interna que permitan la participación de todos.*
- *Documentación del sistema (procedimientos y registros).*
- *Control de las operaciones asociadas a los aspectos energéticos significativos, incluyendo equipos, instalaciones y edificios*
- *Establecimiento de procedimientos y criterios operacionales para situaciones en las que su ausencia podría llevar a desviaciones de los objetivos energéticos.*
- *Comunicación de los procedimientos y requisitos al personal, suministradores, contratistas, compañías de servicios, etc.*
- *Evaluación de los aspectos energéticos en la adquisición de equipos materias primas, productos y servicios.*
- *Evaluación de los aspectos energéticos en el diseño de nuevos proyectos, actividades, instalaciones y edificaciones desde sus etapas más tempranas.*

### ***Examen y medidas correctivas***

- *Seguimiento y medición de las características de las operaciones con un impacto significativo en el uso de la energía.*
- *Evaluación del cumplimiento legal.*
- *Procedimientos para tratamiento de no conformidades reales o potenciales, con la toma de acciones correctivas y preventivas.*
- *Control de los registros necesarios para demostrar la conformidad.*
- *Realización de auditorías internas del SGE.*

### ***Revisión por la dirección***

- *La alta dirección debe revisar el SGE periódicamente y evaluar:*
  - *Su conveniencia, adecuación y eficacia*
  - *Cambios necesarios*
  - *Oportunidades de mejora (p. 50-53)*

### **1.2.3.9. Automatización**

Como se mencionó, un aspecto técnico que junto con la gestión, puede mejorar apreciablemente la eficiencia energética, es la automatización.

El propósito de la automatización de un proceso, sea este simple o complejo, es el de liberar al hombre tanto física como mental de esta tarea. Por tanto se entiende que un sistema es automático, cuando éste puede funcionar casi en total independencia de un operador, casi en su totalidad, pues siempre requerirá del operador para encender, apagar o dar mantenimiento al sistema. (BOLTON, 1996).

De esto se deduce que la automatización sería la realización de proceso de diseño, rediseño o manufactura que permita a un sistema o maquinaria funcionar de manera automática.

El funcionamiento automático de una maquinaria o de un proceso de producción, al depender muy poco del ser humano y estar desarrollado con tecnología

moderna, presenta grandes mejoras en el funcionamiento, entre ellos: menos desperdicio de energía, materiales y tiempo. Esto hace que un sistema automático sea de gran utilidad a la hora de implementar un proyecto de mejora en la eficiencia energética.

### **Automatización industrial.**

La automatización es un conjunto de técnicas que en base a la información recibida de un proceso, actuarán sobre él, realizando acciones de análisis, de organización y control, con el objetivo de optimizar los recursos de producción ya sean materiales, humanos, económicos, etc.

La automatización debe promover el crecimiento de una empresa y para ello debe enfocarse principalmente en: (VELÁSQUEZ, 2004).

- Incrementar la producción de un producto.
- Mejorar la calidad del producto.
- Evitar pérdidas por fallas humanas.
- Disminuir los costos de energía

Todo esto ayudará a mejorar la eficiencia energética y hará más competitiva y más rentable a una empresa. Por otro lado en el artículo “*What Is Automation*” “Que es automatización”, ratifica lo mencionado ya que considera a la automatización como un proceso que debe hacer hincapié en mejorar la calidad, la productividad, la fiabilidad, utilizando para ello sistemas que operen en forma autónoma en entornos estructurados (GOLBERG, 2012).

### **Requerimientos para implementar una automatización.**

Para realizar una automatización se debe seguir un sistema con comportamiento determinístico tanto para obtener precisión en el tiempo y espacio utilizado. El primer reto es conseguir la formalización de los requerimientos necesarios en el sistema a ser desarrollado. Para conseguir los requerimientos mencionados se deben seguir los siguientes pasos:

- Buscar un conjunto de componentes que respondan a estos requerimientos.



- Encontrar la topología física que describa las conexiones de estos componentes.
- Implementar el control de los componentes de tal manera que actúen eficazmente ya sean solos o como un sistema integrado (BOTTCHEER, 2013).

### Principio de un sistema automático

Todo sistema automático debe trabajar en lazo cerrado, esto es, debe tener la posibilidad de cuantificar los parámetros a controlar a través de sensores y sobre la base de estos valores realizar la corrección. Esto se puede ver en la figura 9.

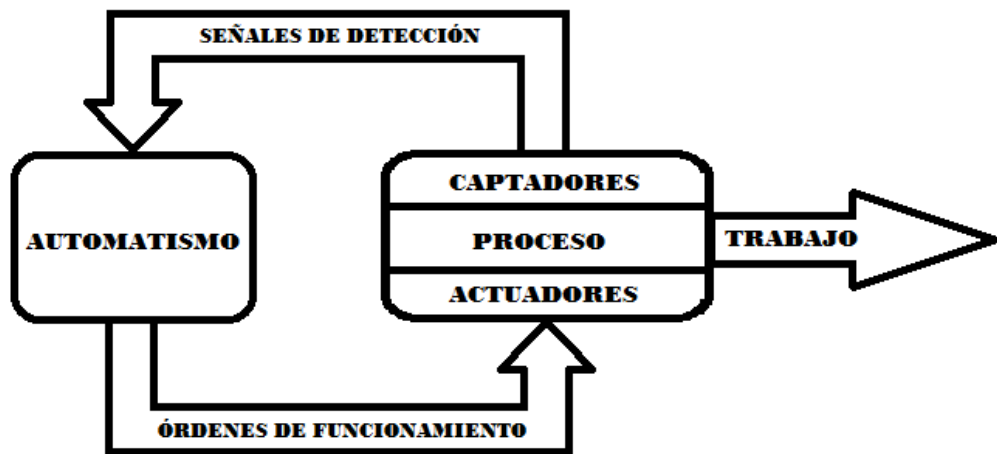


Figura 9 Sistema de control automático en lazo cerrado

Elaborado por: Silva Franklin 2015

Donde los captadores son los sensores es decir aquellos que cuantifican la variable medida, y los actuadores aquellos que actúan directamente sobre la maquinaria o proceso (NISE, 2011).

### Consideraciones para la realización de un automatismo

Para la elaboración correcta de un automatismo así como la selección adecuada de con que realizarlo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Conocer claramente las especificaciones técnicas del sistema que se va a automatizar.
- Cuánto van a costar las diferentes alternativas que se presenten y compararlas con el presupuesto asignado.

- Con qué elementos se va a realizar el trabajo. ¿Existe suficiente soporte técnico e información de los elementos que se pretenden comprar?

### 1.2.3.10. Sensores

El sensor se lo conoce como elemento primario pues es el que se encuentra en contacto con el fenómeno físico, absorbe energía del medio y la convierte en una señal proporcional a la magnitud que desea medir, la cual es ingresada al transmisor.

Al realizar un sistema automático se requiere de un sistema de control el cual por su versatilidad es electrónico, este debe recibir la información de la variable o variables de interés, por tanto se debe tener un dispositivo que permita convertir esta variable física en una variable eléctrica de voltaje y corriente suficiente para ser entendido por el sistema de control. Este dispositivo por tanto estará constituido por un sensor y un transmisor.

El sensor es un elemento que toma parte de la energía de un fenómeno físico el cual se desea medir, y la convierte en una señal eléctrica generalmente de potencia muy pequeña, para amplificarla y convertirla en una señal con potencia suficiente y en valores estándares se utiliza un transmisor.

Existe una gran variedad de sensores y se los puede subdividir en grupos dependiendo de sus características, una de ellas es la magnitud a medir, por lo cual podrían ser de velocidad, nivel, temperatura, presión y muchas más. Otra división los ubica en dos grandes grupos: los activos, que son aquellos que generan por si mismos una señal eléctrica y los pasivos que son aquellos que no generan por si mismos una señal eléctrica y requieren de una fuente eléctrica externa.

Existen varios parámetros que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar un sensor, ente los más importantes se mencionan:

**Rango de medida:** Diferencia entre los máximos y los mínimos valores entre los que se necesita medir. Se le denomina valor de fondo de la escala.

**Resolución:** Menor variación entre dos valores consecutivos de la magnitud física, que es capaz de ser detectada por el sensor.

**Exactitud:** Cuando el valor real y el valor medido se encuentran muy próximos.

**Precisión:** Capacidad que tiene un transductor de repetir el mismo resultado en mediciones diferentes de la misma magnitud, realizadas en las mismas condiciones.

**Sensibilidad:** Relación entre la salida eléctrica y la magnitud física a medir.

En este proyecto de investigación y desarrollo, la variable de interés es la corriente que consume el motor del molino ya que depende de la cantidad de producto que se ingresa al molino. En este caso se pretende mantener la velocidad del molino, de tal manera que produzca la corriente deseada.

El sensor adecuado para este proyecto es un transformador de corriente (figura 10), cuya señal luego es acondicionada mediante un divisor de tensión y amplificadores operacionales.



**Figura 10** Transformadores de corriente para diferentes rangos

**Fuente:** (SHANGHAI, 2015)

### **1.3. Fundamentos de la investigación**

#### **1.3.1. El problema científico**

El problema a resolver en este proyecto de investigación es la determinación de la velocidad óptima de alimentación de producto al molino de martillos.

Para el efecto se realiza el siguiente procedimiento:

- Se ingresa una cantidad determinada de producto a la tolva de entrada.
- Se regula la velocidad de alimentación de producto, mediante la regulación de velocidad del tornillo sin fin.
- Se miden: el voltaje de alimentación y la corriente que circula por el motor del molino, el tiempo que se demora en realizar la molienda y la calidad del producto obtenido.
- Se determina la velocidad óptima, mediante análisis de los valores medidos, cuando se obtiene el menor consumo de energía eléctrica asegurando la calidad de producto deseado.
- La velocidad óptima en realidad busca que la corriente del molino sea la adecuada.

Una vez encontrada la velocidad óptima, ésta debe regularse en el motor del tornillo de alimentación, esto sería suficiente sino existirían perturbaciones en el proceso, como mala dosificación desde la tolva, falta de homogeneidad del producto, entre otras.

Para asegurar la velocidad de alimentación del producto incluso con la existencia de perturbaciones, es necesario además de seleccionar la velocidad, controlar la corriente del molino, la cual es en realidad el parámetro de importancia. Para ello se propone implementar un sistema automático que permita seleccionar la velocidad adecuada de acuerdo a cada producto y la mantenga constante durante todo el proceso, de existir perturbaciones, este sistema cambiará la velocidad para mantener el consumo de corriente adecuado.

### **1.3.2. Viabilidad teórica y práctica**

La implementación del sistema automático para el control de velocidad es totalmente viable ya que un sistema en lazo cerrado es superior en prestaciones a un sistema en lazo abierto, esto está demostrado a satisfacción en la teoría de sistemas de control y en la práctica por miles de proyectos realizados a nivel nacional y muchos más a nivel mundial.

Además la industria Aromas del Tungurahua se encuentra abierta a realizar la inversión necesaria si se demuestran los beneficios de la implementación del sistema propuesto.

## **1.4. Bases teóricas particulares de la investigación**

### **1.4.1. Variables de investigación**

**Variable independiente:** Velocidad de alimentación del producto, en el proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos.

**Variable dependiente:** Eficiencia energética.

## 1.4.2. Operacionalización de las variables

Tabla 2 Operacionalización de la variable independiente

| <i>Variable Independiente</i>  | <i>Concepto</i>   | <i>Categorías</i>  | <i>Indicadores</i>              | <i>Ítems</i> | <i>Técnicas e instrumentos</i>                         |
|--|---|--|---------------------------------|--------------|--|
| Velocidad de alimentación del producto, en el proceso de molienda de productos deshidratados, con molino de martillos. | La velocidad de alimentación de un producto a ser molido en un molino, determina la cantidad y la calidad del producto a la salida del molino.  | Frecuencia que determina la velocidad de alimentación de producto al molino.                             | Frecuencia                      | Hz           | Visor del variador de frecuencia, guía de observación. |
|  | El molino de martillo permite la reducción de tamaño de un producto seco, mediante el golpe del producto por un elemento metálico llamado martillo que gira a gran velocidad acoplado a un eje. (ACUÑA, 2009) | Corriente que consume el molino de martillos es dependiente del producto y la velocidad de alimentación. | Corriente del motor del molino. | Amperios     | Amperímetro, Guía de observación.                      |
|  |   | Variedad de producto   | Tipo de producto                | Producto     | Guía de observación                                    |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

**Tabla 3 Operacionalización de la variable dependiente**

| <b>Variable dependiente</b> | <b>Concepto</b>  | <b>Categorías</b>               | <b>Indicadores</b>        | <b>Ítems</b> | <b>Técnicas e instrumentos</b>                        |
|-----------------------------|--|---------------------------------|---------------------------|--------------|---|
| Eficiencia energética       | <p><i>“Eficiencia Energética se refiere a la implementación de cambios, mejoras, modificaciones, etc. En los procesos, actividades u operaciones, que lleven consigo la intención de propiciar ahorro energético o una mayor eficiencia”</i> (FERNANDEZ, 2009)</p> | Calidad del producto molido.    | Rendimiento               | %            | Balanza, guía de observación, formulario.             |
|                             |  | Cantidad de producto molido     | Masa                      | kg           | Balanza, guía de observación, formulario.             |
|                             |  | Consumo de energía eléctrica.   | Energía consumida         | kWh          | Registrador, guía de observación, formulario.         |
|                             |  | Rentabilidad económica          | Incremento en la ganancia | USD          | Guía de observación, formulario.                      |
|                             |  | Inversión económica (propuesta) | VAN, TIR                  | USD, %       | Guía de observación, formulario, manuales, catálogos. |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

## **CAPÍTULO II**

### **2. METODOLOGÍA**

#### **2.1. Caracterización**

El proyecto se desarrolla en la empresa Aromas de Tungurahua, la cual se dedica al cultivo, producción y comercialización de productos deshidratados, entre ellos: papaya, piña, manzana, hojas de té, alfalfa y otros.

El proceso de molienda de estos productos se basa en un sistema de alimentación de materia prima al molino, el cual está formado por una tolva con capacidad aproximada de 100 kg, un tornillo sin fin de 25 cm de diámetro y 1,5 m de longitud, movido por un motor de 3 kW controlado a su vez por un variador de frecuencia de 5 kW. Un molino de 36 martillos, con un motor de 30 kW, una capacidad de molienda de hasta 1 tonelada diaria.

En cuanto a los productos que se muelen en el molino son diversos, entre ellos cualquier tipo de fruta, hierbas u hojas, la limitante en este caso son las temporadas, ya que no se muelen todos los productos a la vez, sino aquellos que los clientes soliciten, es así que en dos o tres meses solo se producen uno o dos productos, por esta razón se toman para el estudio los productos que durante el período de investigación sean molidos.

La investigación procura buscar un punto de operación con el menor consumo de energía eléctrica posible. Para ello se realizan varios experimentos donde se coloca una cantidad seleccionada del producto en varias ocasiones moliéndose a diferentes velocidades, para cada experimento se mide tanto el tiempo como la corriente consumida, de estos datos se obtiene el consumo de energía eléctrica y se determina la velocidad óptima de alimentación del producto cuando el consumo de energía eléctrica es el mínimo.

Este procedimiento se repite en tres productos diferentes: papaya, manzana y alfalfa.



Una vez determinada la velocidad de alimentación óptima para cada producto, se propone la implementación de un sistema automatizado que permite al operador seleccionar el tipo de producto y realiza la molienda a la velocidad adecuada para cada producto manteniéndola constante aun en presencia de perturbaciones.

Los aspectos a tomarse en cuenta dentro del sistema son:

- **Producto:** Los productos se analizan por separado, en este caso tres de ellos: papaya, manzana y alfalfa, debido a que tienen diferentes características como dureza, densidad y granulometría, de esta manera se puede determinar que el efecto es similar pero con diferentes resultados.
- **Molino:** La investigación se centra en un molino de martillos donde se muelen los productos deshidratados.
- **Mediciones:** Para la determinación del punto óptimo de trabajo, se realizarán pruebas con los tres productos, cada uno de ellos para cinco velocidades, las variables a medir son: el peso de entrada, peso a la salida, peso a la salida con calidad adecuada; el voltaje y la corriente que consume el motor del molino y el tiempo que demora cada molienda.

El peso a la entrada se determina con una balanza que asegura una precisión mejor al 1%, de igual manera el peso a la salida tanto total como con la calidad adecuada se mide con la misma balanza, pero estos datos dependen además del proceso, por tanto para determinar la cantidad de mediciones necesarias se recurre a datos históricos que posee la empresa y se analizan estos datos utilizando la t de student con su fórmula:

$$t = \frac{\delta \cdot \sqrt{n}}{\sigma}; \text{ (COELLO, 2010)}$$

Donde:

t = es el valor de t de student

n = número de mediciones realizadas (igual al número de moliendas realizadas)

$\delta$  = El error permisible en la medición

$\sigma$  = La desviación estándar.

El dato más importante es el peso a la salida con calidad adecuada, de la información presentada por la empresa para el caso de la papaya, se obtienen los siguientes datos:

Valor medio = 50 kg

$\sigma = 0,7$

Considerando un error permisible del 5 % es decir 2,5 kg y suponiendo la realización de tres mediciones  $n = 3$ , se obtiene una  $t$  de student  $t = 2,99$  que de acuerdo a las tablas asegura que las mediciones estén dentro de este rango con una probabilidad cercana al 95%.

Para el tiempo, que depende de un cronómetro de alta precisión y del proceso se analizan los datos históricos de la papaya donde:

Valor medio = 22,54 min

$\sigma = 0,33$

De igual manera considerando un error permisible del 5% es decir 1,12 min, suponiendo tres mediciones, se obtiene  $t = 1,95$  que de acuerdo a las tablas, nos asegura que los valores estén dentro del rango con una probabilidad superior al 95%.

El voltaje y la corriente se miden con instrumentos de alta precisión, igual al 0,5 %, y se toman muchos valores durante cada proceso por lo tanto superan las tres mediciones que en los casos anteriores son necesarias.

Por tanto se puede observar que son suficientes la realización de tres procesos de molienda para cada producto y velocidad de alimentación del producto, para obtener datos confiables con un error permisible de 5%.

Si se consideran tres repeticiones de cada medición el número total de mediciones es:  $3(\text{productos}) * 5(\text{velocidades}) * 6(\text{parámetros}) * 3(\text{repeticiones})$ , que dan un total de 540 mediciones.

### **Diseño de experimento:**

Para la determinación del punto óptimo de trabajo, la variable a manipular es la velocidad de alimentación del producto al molino de martillos, se identificará inicialmente la velocidad cercana a la óptima, mediante un muestreo rápido que carece de precisión, para luego realizar por lo menos dos valores por encima y dos valores por debajo de esta velocidad y acercarse con mayor exactitud a la velocidad óptima de trabajo.

Se requiere en esta investigación la medición de variables como: el peso de entrada, peso a la salida, peso a la salida con calidad adecuada; el voltaje y la corriente que consume el motor del molino, el tiempo que demora cada molienda. De estos datos se obtienen: porcentaje de producto con la calidad deseada y la potencia consumida, se realizan gráficas y un análisis para determinar las mejoras que se pueden obtener al implementar la propuesta.

### **2.2. Técnicas para la obtención de datos**

- **La entrevista.-** Se utiliza la entrevista tanto a directivos como a operarios de la empresa Aromas del Tungurahua con la finalidad de obtener información que determine tanto el problema como la necesidad de corregirlo, para el efecto se utiliza la guía de entrevista y observación.
- **La medición.-** Para el experimento, se escoge uno de los productos, se define una cantidad del producto, esta cantidad es utilizada en varias ocasiones, en cada una de ellas con un valor diferente de velocidad de alimentación. Se miden entonces cada uno de los siguientes parámetros:
  - **Peso de entrada [kg]:** Que consiste en medir el peso del producto que se va a moler.
  - **Peso a la salida [kg]:** Se refiere al peso que tiene todo el producto que sale como resultado de la molienda.
  - **Peso a la salida con calidad adecuada [kg]:** Se refiere al peso del producto que se obtiene a la salida de la molienda que presenta la calidad deseada.

En todos estos casos se utiliza una balanza de piso marca BSA con capacidad de 150 kg y una resolución de 20 g. Anexo F.

- El voltaje [V], y la corriente [A], que consume el motor del molino, para lo cual se utiliza un multímetro FLUKE con una precisión de 0,5 %. Anexo E.
- El tiempo [s], que demora cada molienda, se usa un cronómetro con resolución de décimas de segundo.
- Frecuencia [Hz], que determina la velocidad a la que gira el motor del tornillo sinfín que alimenta de producto al molino de martillos, se usa el display del variador de frecuencia.

Estos datos se pueden apreciar en los puntos: 2.4.2.1 Muestreo rápido y 2.4.2.2 Muestreo detallado.

- **La modelación y la simulación.**- la modelación y simulación se realizan con la ayuda de MatLab 7 y LabView 2014, para validar el diseño del sistema automático.

### **2.3. Procedimiento utilizado para determinar los datos medidos necesarios.**

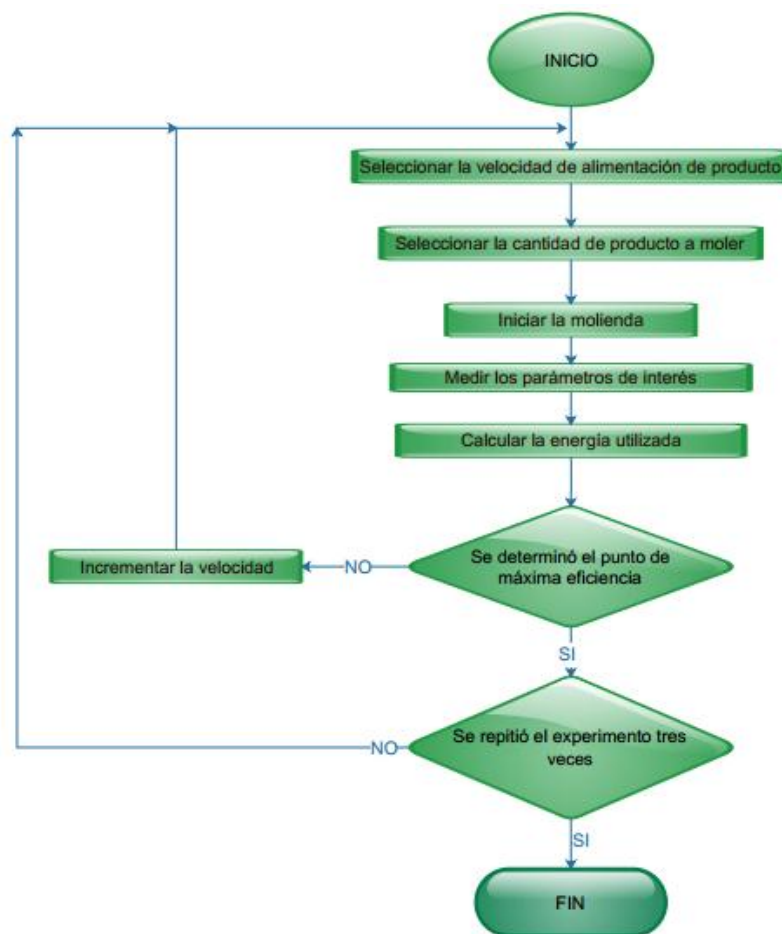
Para obtener cada uno de los datos medidos, se realizan por lo menos tres veces la medición de cada parámetro de interés.

Se realiza todo el proceso de molienda para un peso y velocidad determinado en tres ocasiones.

Se realiza el proceso de molienda variando la velocidad de alimentación del producto en por lo menos dos velocidades por encima y por debajo de la velocidad óptima determinada en el muestreo rápido.

Se realiza un análisis matemático de todos los datos y se los compara con la teoría.

Visto en un diagrama de flujo el procedimiento sería:



**Figura 11 Diagrama de flujo para validar la calidad de los datos**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

## **2.4. Datos obtenidos**

### **2.4.1. Datos obtenidos de las entrevistas**

Se realiza una entrevista dirigida a los directivos de la empresa y al técnico eléctrico-electrónico.

El objetivo que persigue la entrevista es identificar cual es el problema que se desea resolver, si existe la necesidad de hacerlo y si los directivos están interesados en realizarlo.

Luego de realizar la entrevista, se obtuvieron los siguientes resultados:

Los directivos creen que sí se mal utiliza el tiempo, pero que por el momento esto no representa un problema, sin embargo con el crecimiento que se tiene planificado, este problema puede ser apreciable y desean evitarlo.

La opinión del técnico coincide en que si se utiliza mal el tiempo, lo cual si es o no representativo, se debe evitar en la medida de lo posible, y que esto se debe realizar o tener planeado antes que se dé el crecimiento que la empresa tiene planificado.

Tanto directivos como el técnico, coinciden que actualmente el operador no tiene dificultad en controlar la velocidad de alimentación de producto al molino, pero consideran que esto cambiará cuando se aumente apreciablemente la producción, por lo cual muestran su deseo de que se realice un proyecto de automatización que asegure un control adecuado.

Los directivos y técnico indican que la velocidad de alimentación al producto, depende del producto que se vaya a moler, y que se la regula en base a la experiencia del operador, quien se basa en el sonido que tiene el molino durante la molienda, sin embargo desean que se realice un análisis técnico que permita conocer la velocidad adecuada para cada producto.

Los directivos, están involucrados en el proceso, y con la ayuda de los operadores y el técnico, han tratado constantemente, mediante pruebas, de disminuir el producto residual, e indican que si bien han conseguido una cantidad pequeña no están seguros que esta sea la mínima, y recalcan el deseo que esto se analice y de ser posible se dé una solución que permita conseguir la cantidad mínima de desperdicio.

Sobre la calidad del producto indican que trabajan con Buenas Prácticas de Manufactura BPM ISO 22000, Certificación Kosher, con la Administración de drogas y alimentos FDA por sus siglas en inglés y con granulometrías que van desde MESH 14 a MESH 100 (número de agujeros en una pulgada lineal, ver anexo D), además fueron muy directos al indicar que no se han escatimado esfuerzos para conseguir la calidad adecuada, ya que si no la hubieran conseguido no podrían venderla en el mercado. Sin embargo creen que este

esfuerzo ha demandado de mucho tiempo y recursos tanto humanos como económicos por tanto, están deseosos de que se pueda darles una alternativa que cambie esto.

Directivos y el técnico consideran que existen paros, que su efecto es mínimo, pero que si se puede evitarlos, se debe analizar una propuesta que será aceptada dependiendo de la inversión que sea necesaria y los beneficios que ella pueda aportar.

Los directivos y en especial el técnico indican que la corriente del motor del molino, no es constante y que se debe a que la alimentación del producto al molino no es controlada a cada instante y que esto afecta a la calidad (granulometría) del producto. Desean un sistema que mejore esta situación en especial para cuando se dé el crecimiento de producción previsto.

Los directivos conocen de la automatización, pero dejan que el técnico de su opinión como experto, quien aseguró que un automatismo es siempre beneficioso, ante lo cual los directivos indicaron que deberían conocer los costos y beneficios que este sistema demande antes de tomar cualquier decisión.

#### **2.4.2. Metodología para la determinación de la velocidad óptima de alimentación de producto**

La alimentación de producto se hace mediante un tornillo sin fin controlado por un motor de 3 kW, que toma el producto de una tolva y lo lleva hacia el molino de martillos. El motor del tornillo está regulado por un variador de frecuencia de tal manera que al entregarle 60 Hz, gira a la máxima velocidad aproximada a 1800 rpm y para diferente frecuencia la velocidad es proporcional a ella.

Por tanto para determinar la velocidad óptima de alimentación del producto, se determinará la frecuencia de alimentación al motor que sea necesaria.

La metodología a utilizarse es la siguiente:

- Se utiliza el producto de temporada existente.

- Se determina una cantidad a ser molida en función de la cantidad disponible y que permita realizar por lo menos 5 experimentos por producto, cada uno a diferentes velocidades. Esto se repite por tres ocasiones.
- Se selecciona la frecuencia a la cual funciona el motor del tornillo transportador.
- Se coloca el producto a moler en la tolva de alimentación.
- Se inicia el proceso de molienda.
- Durante el proceso se mide:
  - Tiempo que se demora en moler el producto.
  - Corriente promedio que consume el motor del molino.
  - La cantidad de producto que sale.
  - La cantidad de producto que sale con la calidad adecuada.
- Con los valores obtenidos se calcula:
  - El porcentaje de producto de buena calidad en relación al total de producto obtenido.
  - El porcentaje de producto que sale de la molienda en relación al total de producto que ingresa.
  - La cantidad de energía utilizada en cada proceso de molienda.

Dónde:

**Total molido**, es la cantidad que ingresa al proceso de molienda.

**Polvo útil**, es la cantidad de polvo con la calidad para ser vendido.

**Afrecho**, es la cantidad de producto que no tiene la calidad para ser vendido.

**Total obtenido**, es la cantidad total que sale del proceso, tanto polvo útil como afrecho.

**Tiempo**, es el tiempo que se requiere para moler una determinada cantidad de producto.

**Corriente**, es el valor promedio de corriente que consume el motor del molino durante el proceso.



**Energía utilizada**, es la cantidad de energía eléctrica utilizada, para moler una cantidad determinada de producto.

El procedimiento mencionado se realiza de dos maneras, un muestreo rápido en el cual se toman mediciones sin mucha precisión para determinar un punto cercano a la velocidad óptima, en base a este dato, se realiza un muestreo detallado, con mayor precisión, en el cual se realizan varios experimentos con velocidades cercanas a la óptima, hasta encontrar de manera confiable el resultado.

Visto el procedimiento como un algoritmo y representado en un diagrama de flujo se puede observar en la figura 12:

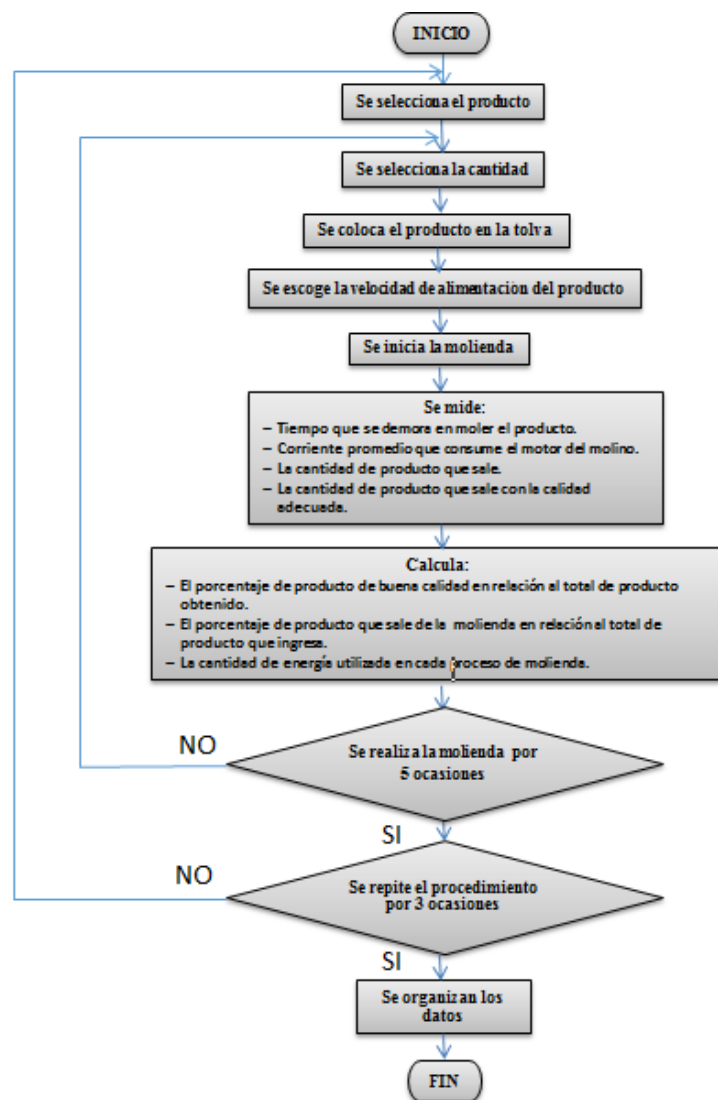


Figura 12 Diagrama de flujo para validar la calidad de los datos

Elaborado por: Silva Franklin 2015

### 2.4.2.1. Muestreo rápido

El presente trabajo se realiza para tres productos, alfalfa, manzana y papaya, la cantidad a utilizar en cada experimento depende de la cantidad total disponible de cada producto al momento de realizarlo.

#### **Alfalfa:**

Se utilizan 33 Kg, la velocidad del motor del molino es regulada por la frecuencia aplicada, por tanto es ésta última la que se tomará en cuenta, los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 4.

**Tabla 4 Datos de muestreo rápido para la molienda de alfalfa.**

| No. | FRECUENCIA (Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | AFRECHO (kg) | TIEMPO (min:seg) | TIEMPO (min) | CORRIENTE (A) | TOTAL MOLIDO (kg) | TOTAL OBTENIDO (kg) | POLVO ÚTIL/TOTAL OBTENIDO (%) | TOTAL OBTENIDO/TOTAL MOLIDO (%) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h) |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1   | 50              | 11,76           | 21,12        | 11:25            | 11,42        | 36,5          | 33,00             | 32,88               | 35,77                         | 99,64                           | 0,76                     |
| 2   | 52              | 15,88           | 16,84        | 10:42            | 10,70        | 37,1          | 33,00             | 32,72               | 48,53                         | 99,15                           | 0,727                    |
| 3   | 60              | 14,62           | 18,13        | 09:53            | 9,88         | 40,2          | 33,00             | 32,75               | 44,64                         | 99,24                           | 0,73                     |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

#### **Manzana:**

Se utilizan 50 Kg, los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 5.

**Tabla 5 Datos de muestreo rápido para la molienda de manzana.**

| No. | FRECUENCIA (Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | AFRECHO (kg) | TIEMPO (min:seg) | TIEMPO (min) | CORRIENTE (A) | TOTAL MOLIDO (kg) | TOTAL OBTENIDO (kg) | POLVO ÚTIL/TOTAL OBTENIDO (%) | TOTAL OBTENIDO/TOTAL MOLIDO (%) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h) |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1   | 30              | 35,51           | 14,41        | 11:15            | 11,25        | 37,1          | 50,00             | 49,92               | 71,13                         | 99,84                           | 0,77                     |
| 2   | 35              | 36,16           | 13,78        | 11:00            | 11,00        | 38,3          | 50,00             | 49,94               | 72,41                         | 99,88                           | 0,77                     |
| 3   | 40              | 36,81           | 13,07        | 10:12            | 10,10        | 39,0          | 50,00             | 49,88               | 73,80                         | 99,76                           | 0,72                     |
| 4   | 45              | 38,17           | 11,76        | 10:00            | 10,00        | 40,4          | 50,00             | 49,93               | 76,45                         | 99,86                           | 0,74                     |
| 5   | 50              | 36,99           | 12,93        | 09:30            | 9,50         | 44,1          | 50,00             | 49,92               | 74,10                         | 99,84                           | 0,77                     |
| 6   | 55              | 36,68           | 12,96        | 09:08            | 9,13         | 45,8          | 50,00             | 49,64               | 73,89                         | 99,28                           | 0,77                     |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

#### **Papaya:**

Se utilizan 60 Kg, los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 6.

**Tabla 6 Datos de muestreo rápido para la molienda de papaya.**

| No. | FRECUENCIA (Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | AFRECHO (kg) | TIEMPO (min:seg) | TIEMPO (min) | CORRIENTE (A) | TOTAL MOLIDO (kg) | TOTAL OBTENIDO (kg) | POLVO ÚTIL/TOTAL OBTENIDO (%) | TOTAL OBTENIDO/TOTAL MOLIDO (%) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h) |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1   | 20              | 48,25           | 11,71        | 24:13            | 24,22        | 36,0          | 60,00             | 59,96               | 80,47                         | 99,93                           | 1,60                     |
| 2   | 24              | 48,39           | 11,52        | 23:26            | 23,43        | 37,0          | 60,00             | 59,91               | 80,77                         | 99,85                           | 1,59                     |
| 3   | 26              | 48,50           | 10,94        | 22:26            | 22,43        | 38,0          | 60,00             | 59,44               | 81,59                         | 99,07                           | 1,56                     |
| 4   | 30              | 50,80           | 8,71         | 21:10            | 21,17        | 39,0          | 60,00             | 59,51               | 85,36                         | 99,18                           | 1,51                     |
| 5   | 35              | 49,82           | 10,11        | 20:00            | 20,00        | 42,4          | 60,00             | 59,93               | 83,13                         | 99,88                           | 1,55                     |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

### 2.4.2.2. Muestreo detallado

Una vez realizado el muestreo rápido, se toma un mayor número de datos que junto a los obtenidos, permitieron conocer de mejor manera el punto de trabajo óptimo. Para el muestreo detallado se utiliza el mismo peso que en el muestreo rápido para tener un criterio rápido de comparación.

#### Alfalfa:

Para la alfalfa se utiliza un peso de 33 kg, se procede a realizar el experimento tanto para frecuencias por encima y por debajo de la frecuencia encontrada en el muestreo rápido que es de 52 Hz. Los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 7.

**Tabla 7 Datos de muestreo detallado para la molienda de alfalfa.**

| No. | FRECUENCIA (Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | AFRECHO (kg) | TIEMPO (min:seg) | TIEMPO (min) | CORRIENTE (A) | TOTAL MOLIDO (kg) | TOTAL OBTENIDO (kg) | POLVO ÚTIL/TOTAL OBTENIDO (%) | TOTAL OBTENIDO/TOTAL MOLIDO (%) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h) |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1   | 46              | 9,45            | 23,35        | 10:00            | 12,50        | 35,6          | 33,00             | 32,80               | 28,81                         | 99,39                           | 2,83                     |
| 2   | 48              | 10,00           | 22,80        | 10:35            | 12,08        | 36            | 33,00             | 32,80               | 30,49                         | 99,39                           | 2,76                     |
| 3   | 50              | 11,77           | 21,03        | 11:25            | 11,42        | 36,5          | 33,00             | 32,80               | 35,88                         | 99,39                           | 2,65                     |
| 4   | 52              | 15,95           | 16,93        | 10:42            | 10,70        | 37,1          | 33,00             | 32,88               | 48,51                         | 99,64                           | 2,52                     |
| 5   | 54              | 16,11           | 16,72        | 10:20            | 10,33        | 37,8          | 33,00             | 32,83               | 49,07                         | 99,48                           | 2,48                     |
| 6   | 56              | 15,85           | 16,95        | 10:13            | 10,22        | 38,4          | 33,00             | 32,80               | 48,32                         | 99,39                           | 2,49                     |
| 7   | 58              | 15,19           | 16,93        | 10:03            | 10,05        | 39,2          | 33,00             | 32,12               | 47,29                         | 97,33                           | 2,50                     |
| 8   | 60              | 14,90           | 16,05        | 09:53            | 9,88         | 40,2          | 33,00             | 30,95               | 48,14                         | 93,79                           | 2,52                     |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

### **Manzana:**

Para la manzana se utiliza un peso de 50 kg, se procede a realizar el experimento tanto para frecuencias por encima y por debajo de la frecuencia encontrada en el muestreo rápido que está cercana a los 45 Hz. Los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 8.

**Tabla 8 Datos de muestreo detallado para la molienda de manzana.**

| No. | VELOCIDAD (Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | AFRECHO (kg) | TIEMPO (min:seg) | TIEMPO (min) | CORRIENTE (A) | TOTAL MOLIDO (kg) | TOTAL OBTENIDO (kg) | POLVO ÚTIL/TOTAL OBTENIDO (%) | TOTAL OBTENIDO/ TOTAL MOLIDO (%) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h) |
|-----|----------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 1   | 30             | 36,81           | 13,10        | 11:15            | 11,25        | 37,1          | 50,00             | 49,91               | 73,75                         | 99,82                            | 2,65                     |
| 2   | 32             | 36,96           | 12,98        | 11:11            | 11,18        | 37,6          | 50,00             | 49,94               | 74,01                         | 99,88                            | 2,67                     |
| 3   | 34             | 36,98           | 12,91        | 11:05            | 11,08        | 38,0          | 50,00             | 49,89               | 74,12                         | 99,78                            | 2,67                     |
| 4   | 36             | 37,04           | 12,89        | 11:00            | 11,00        | 38,2          | 50,00             | 49,93               | 74,18                         | 99,86                            | 2,67                     |
| 5   | 38             | 37,55           | 12,37        | 10:23            | 10,38        | 39,2          | 50,00             | 49,92               | 75,22                         | 99,84                            | 2,58                     |
| 6   | 40             | 38,22           | 11,72        | 10:12            | 10,20        | 39,4          | 50,00             | 49,94               | 76,53                         | 99,88                            | 2,55                     |
| 7   | 42             | 38,44           | 11,49        | 10:00            | 10,00        | 40,0          | 50,00             | 49,93               | 76,99                         | 99,86                            | 2,54                     |
| 8   | 44             | 38,55           | 11,39        | 10:00            | 10,00        | 40,0          | 50,00             | 49,94               | 77,19                         | 99,88                            | 2,54                     |
| 9   | 46             | 38,55           | 11,35        | 09:55            | 9,92         | 41,0          | 50,00             | 49,90               | 77,25                         | 99,80                            | 2,58                     |
| 10  | 48             | 38,27           | 11,64        | 09:33            | 9,55         | 43,2          | 50,00             | 49,91               | 76,68                         | 99,82                            | 2,62                     |
| 11  | 50             | 37,91           | 12,02        | 09:30            | 9,50         | 44,1          | 50,00             | 49,93               | 75,93                         | 99,86                            | 2,66                     |
| 12  | 52             | 37,20           | 12,71        | 09:24            | 9,40         | 44,8          | 50,00             | 49,91               | 74,53                         | 99,82                            | 2,67                     |
| 13  | 54             | 36,39           | 13,50        | 09:18            | 9,30         | 45,2          | 50,00             | 49,89               | 72,94                         | 99,78                            | 2,67                     |

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

### **Papaya:**

Para la papaya se utiliza un peso de 60 kg, se procede a realizar el experimento tanto para frecuencias por encima y por debajo de la frecuencia encontrada en el muestreo rápido que está cercana a los 28 Hz. Los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 9.

**Tabla 9 Datos de muestreo detallado para la molienda de papaya.**

| No. | FRECUENCIA (Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | AFRECHO (kg) | TIEMPO (min:seg) | TIEMPO (min) | CORRIENTE (A) | TOTAL MOLIDO (kg) | TOTAL OBTENIDO (kg) | POLVO ÚTIL/TOTAL OBTENIDO (%) | TOTAL OBTENIDO/TOTAL MOLIDO (%) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h) |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1   | 20              | 48,04           | 11,88        | 24:13            | 24,22        | 36,0          | 60,00             | 59,92               | 80,17                         | 99,87                           | 1,60                     |
| 2   | 22              | 49,32           | 10,61        | 23:59            | 23,98        | 36,2          | 60,00             | 59,93               | 82,29                         | 99,88                           | 1,59                     |
| 3   | 24              | 50,08           | 9,83         | 23:26            | 23,43        | 37,0          | 60,00             | 59,91               | 83,60                         | 99,85                           | 1,59                     |
| 4   | 26              | 50,87           | 9,05         | 22:26            | 22,43        | 38,0          | 60,00             | 59,92               | 84,89                         | 99,87                           | 1,56                     |
| 5   | 28              | 51,09           | 8,83         | 22:14            | 22,23        | 38,2          | 60,00             | 59,92               | 85,26                         | 99,87                           | 1,56                     |
| 6   | 30              | 51,19           | 8,69         | 21:10            | 21,17        | 39,0          | 60,00             | 59,88               | 85,49                         | 99,80                           | 1,51                     |
| 7   | 32              | 51,05           | 8,88         | 20:48            | 20,80        | 40,5          | 60,00             | 59,93               | 85,19                         | 99,88                           | 1,54                     |
| 8   | 34              | 50,68           | 9,23         | 20:07            | 20,12        | 42,0          | 60,00             | 59,91               | 84,59                         | 99,85                           | 1,55                     |
| 9   | 36              | 50,52           | 9,40         | 19:50            | 19,83        | 43,1          | 60,00             | 59,92               | 84,31                         | 99,87                           | 1,57                     |
| 10  | 38              | 50,30           | 9,58         | 19:30            | 19,50        | 43,8          | 60,00             | 59,88               | 84,01                         | 99,80                           | 1,57                     |
| 11  | 40              | 49,33           | 10,45        | 19:03            | 19,05        | 44,9          | 60,00             | 59,78               | 82,52                         | 99,63                           | 1,57                     |

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

## **2.5. Procedimiento para la obtención de la velocidad óptima de molienda.**

Una vez obtenido los datos de interés, estos se tabulan con la ayuda del software EXCEL, con el cual se realizan tablas y gráficos, que permiten determinar el valor de velocidad de alimentación del producto para el cual se obtiene un menor consumo de energía eléctrica.

## **CAPÍTULO III**

### **3. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

La investigación realizada además de los experimentos realizados para determinar el punto de trabajo de máxima eficiencia energética incluyó una entrevista realizada a los directivos, técnicos y operarios.

#### **3.1. Resultados obtenidos en la entrevista**

De los datos obtenidos se concluyen los siguientes resultados:

Directivos y técnico están de acuerdo a que por el momento existen problemas, pero pequeños, expresan el deseo de realizar un estudio técnico que indique si esto es realidad.

Sin embargo están muy conscientes que si estos problemas no son de importancia este momento, lo serán en un futuro muy próximo ya que se tiene previsto un crecimiento apreciable en corto tiempo. Por tanto requieren que el estudio técnico que se realice les indique los problemas existentes, su efecto y como evitarlos.

Desean además una propuesta que permita mejorar la eficiencia energética, desean conocer los costos y los beneficios para tomar decisiones adecuadas.

Se desea automatizar el proceso de molienda para que éste trabaje en un punto óptimo tanto de calidad como de consumo eléctrico, esto se consigue cuando la alimentación del producto se realiza a una determinada velocidad y es controlada durante el tiempo que dura la molienda.

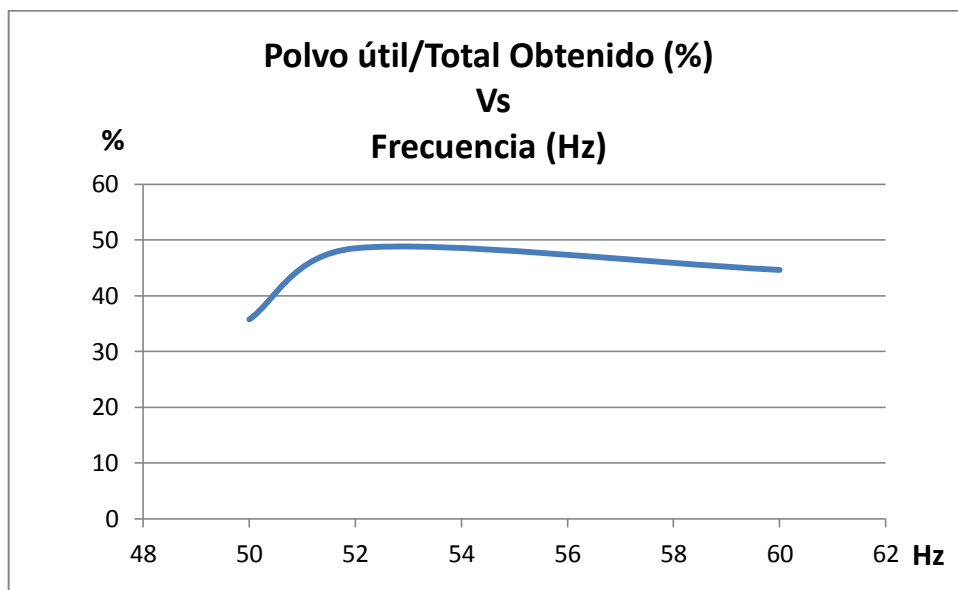
#### **3.2. Resultados obtenidos en la determinación de la velocidad de alimentación de producto**

Los resultados obtenidos son analizados con la ayuda de gráficos utilizando para ello el software Excel.

### 3.2.1. Muestreo rápido

Para el caso de muestreo rápido se presentarán tan solo los resultados de alfalfa, de los datos presentados en el capítulo anterior, podemos observar las siguientes gráficas:

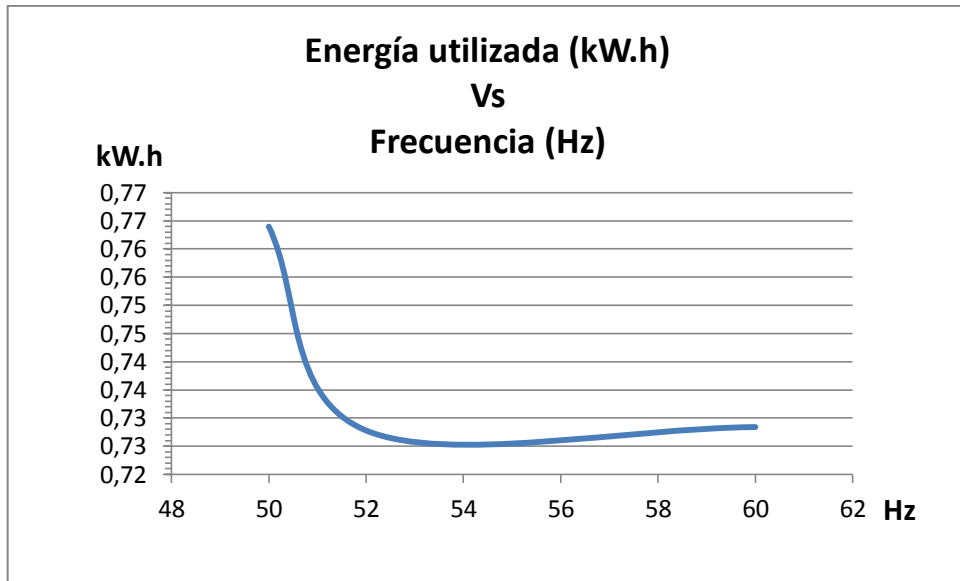
En la figura 13 se puede ver que la frecuencia a la que se obtiene el mayor porcentaje de polvo útil es a una frecuencia cercana a los 52 Hz.



**Figura 13 Polvo útil /Total obtenido (%) Vs frecuencia del motor de molino (Hz), alfalfa.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

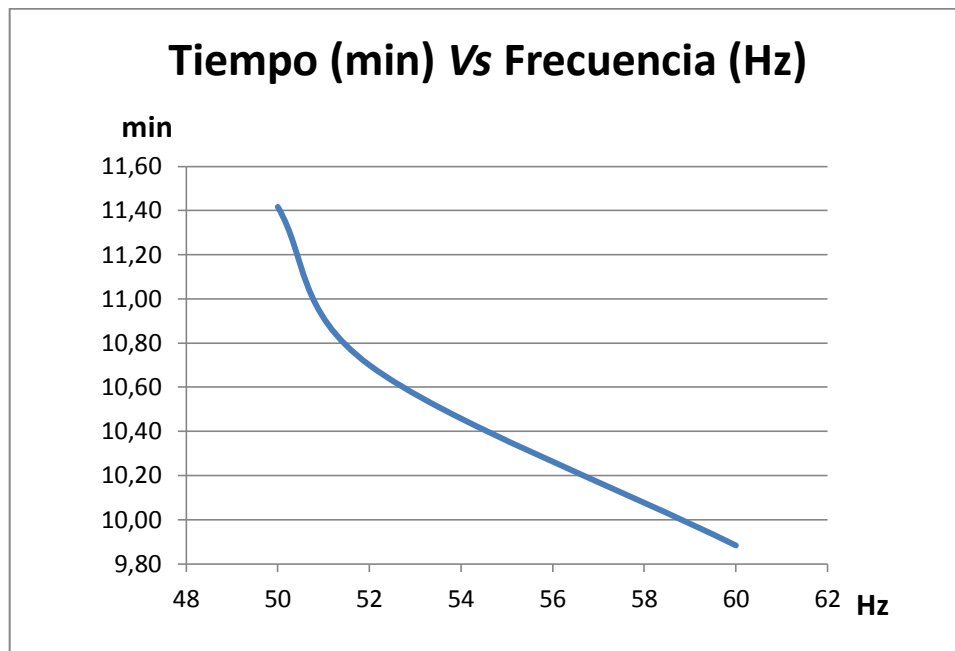
Otro factor muy determinante es el consumo de energía eléctrica en dependencia de la frecuencia aplicada al motor del molino, esta se puede observar en la figura 14. Donde también la frecuencia a la que se obtiene el menor consumo energético es de igual manera una frecuencia cercana a los 52 Hz.



**Figura 14** Energía utilizada (kW.h) Vs Frecuencia del motor del molino (Hz), alfalfa.

Elaborado por: Silva Franklin 2015

En la figura 15 se observa que el tiempo de molienda disminuye a medida que la frecuencia aplicada al motor del molino aumenta.

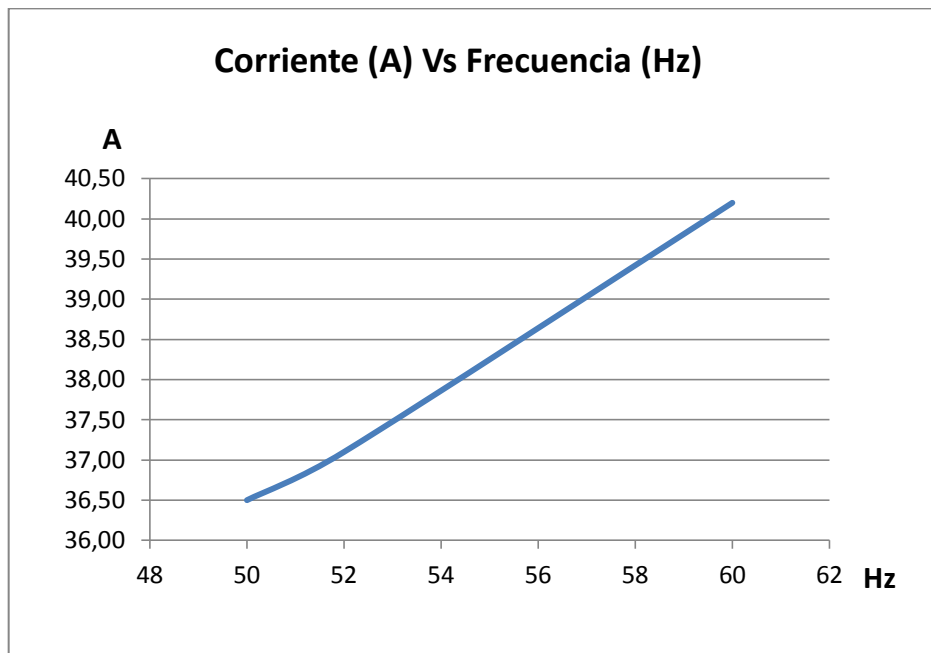


**Figura 15** Tiempo de molienda (min) Vs Frecuencia aplicada al motor de molino (Hz), alfalfa.

Elaborado por: Silva Franklin 2015



En la figura 16, se puede observar que la corriente del motor del molino aumenta a medida que la frecuencia aplicada al motor del molino aumenta.

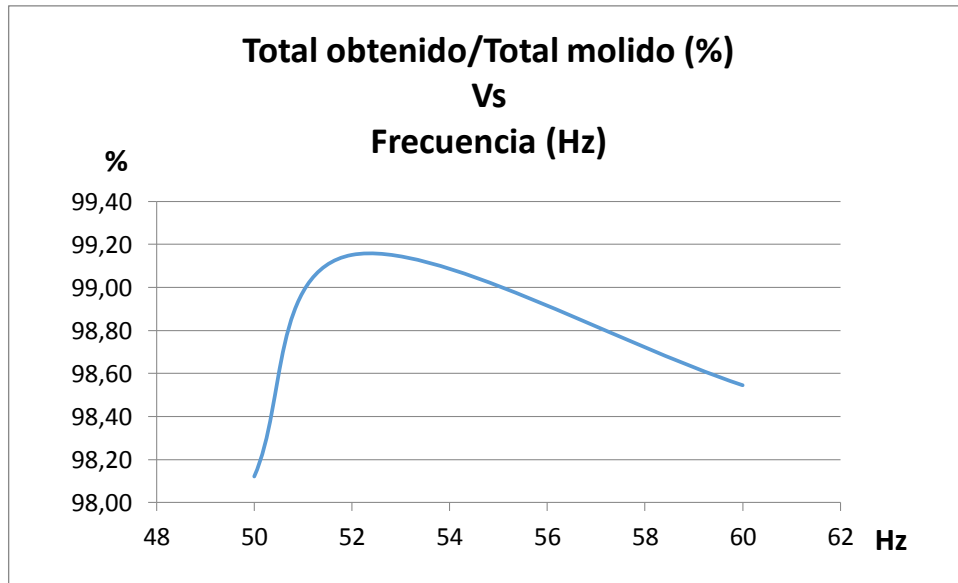


**Figura 16 Corriente del motor del molino (A) Vs frecuencia aplicada motor del molino (Hz), alfalfa.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

En cuanto a la eficiencia de la molienda que se considera la razón entre el total molido sobre el total ingresado, el valor máximo se obtiene también a una frecuencia cercana a los 52 Hz vea la figura 17. Esto permite ver que al trabajar en el punto de máxima eficiencia energética se obtiene también la mayor eficiencia en calidad de producto.

Sin embargo este dato depende mucho de cómo se recoge el producto a la salida, esto demanda de mucho tiempo y esfuerzo por lo cual no siempre se lo pudo realizar correctamente, por tanto este dato no se utilizará en adelante, pero al menos con la alfalfa está demostrado que esto ocurre.



**Figura 17 Total obtenido/total molido (%) Vs frecuencia aplicada motor del molino (Hz), alfalfa.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

De las gráficas anteriores y su análisis se puede desprender que para la alfalfa, la frecuencia con la cual se obtiene la velocidad óptima de alimentación de producto al molino, está cercana a los 52 Hz, ya que con esta frecuencia se tiene el mayor rendimiento con el menor consumo y la mayor cantidad de producto útil.

#### **Manzana:**

De igual manera que en el caso anterior se utilizan gráficos como ayuda y se determina que la frecuencia de trabajo para obtener la velocidad óptima de alimentación de producto está cercana a 45 Hz.

#### **Papaya:**

En este caso y utilizando los gráficos como ayuda, se determina que la frecuencia de trabajo para obtener la velocidad óptima de alimentación de producto está cercana a 28 Hz.

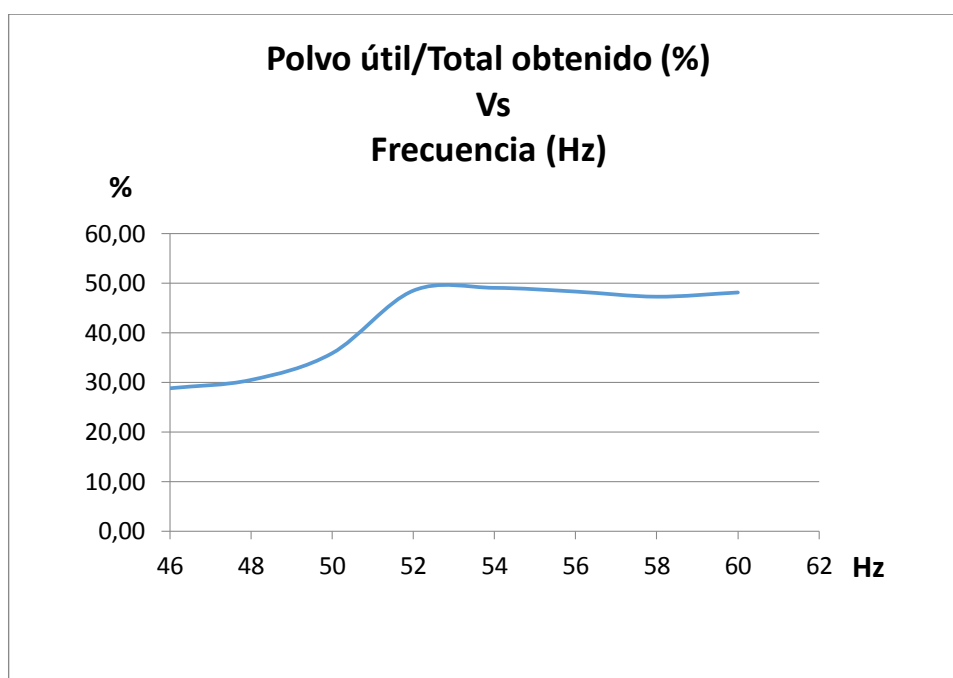
### 3.2.2. Muestreo detallado

Una vez realizado el muestreo rápido, se toma un mayor número de datos que junto a los obtenidos, permitieron conocer de mejor manera el punto de trabajo óptimo. Para el muestreo detallado se utiliza el mismo peso que en el muestreo rápido para tener un criterio rápido de comparación.

#### **Alfalfa:**

Para la alfalfa se utiliza un peso de 33 kg, se procede a realizar el experimento tanto para frecuencias por encima y por debajo de la frecuencia encontrada en el muestreo rápido que es de 52 Hz.

Se utilizan gráficas para analizar de mejor manera los datos, en la figura 18, se puede observar el porcentaje de polvo útil del total obtenido a la salida del molino en dependencia de la frecuencia aplicada al motor del molino.

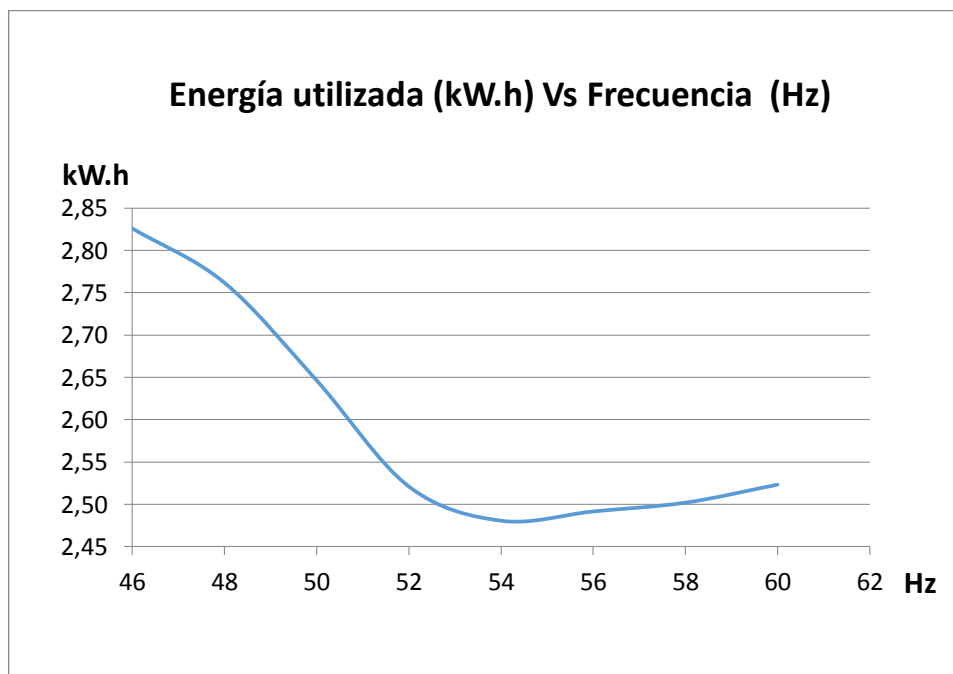


**Figura 18 Polvo útil/Total obtenido (%) Vs velocidad del motor de molino (Hz), alfalfa.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

De la figura 18 podemos observar que la frecuencia a la cual se obtiene mayor cantidad de producto con las calidad deseada, es de 52 Hz.

En la figura 19 se observa que el consumo mínimo se da a una frecuencia de alimentación al motor del molino cercana a 54 Hz.



**Figura 19** Energía utilizada (kW.h) Vs frecuencia aplicada al motor del molino (Hz), alfalfa.

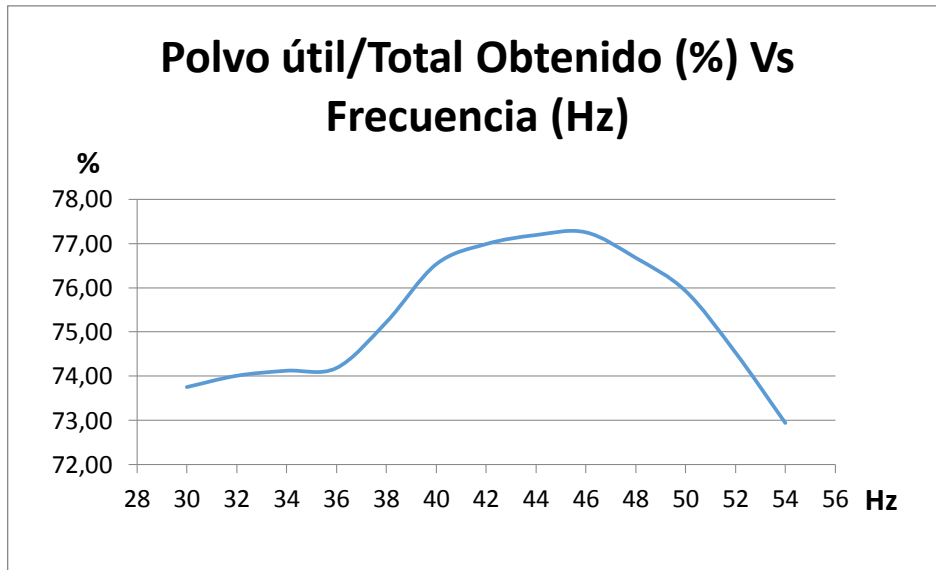
**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

De los datos observados en las figuras 18 y 19 se concluye que para trabajar con la máxima eficiencia eléctrica posible y obtener la mayor cantidad de producto con la calidad necesaria, se debe escoger una frecuencia de alimentación al motor del molino entre 52 y 54 Hz.

### **Manzana:**

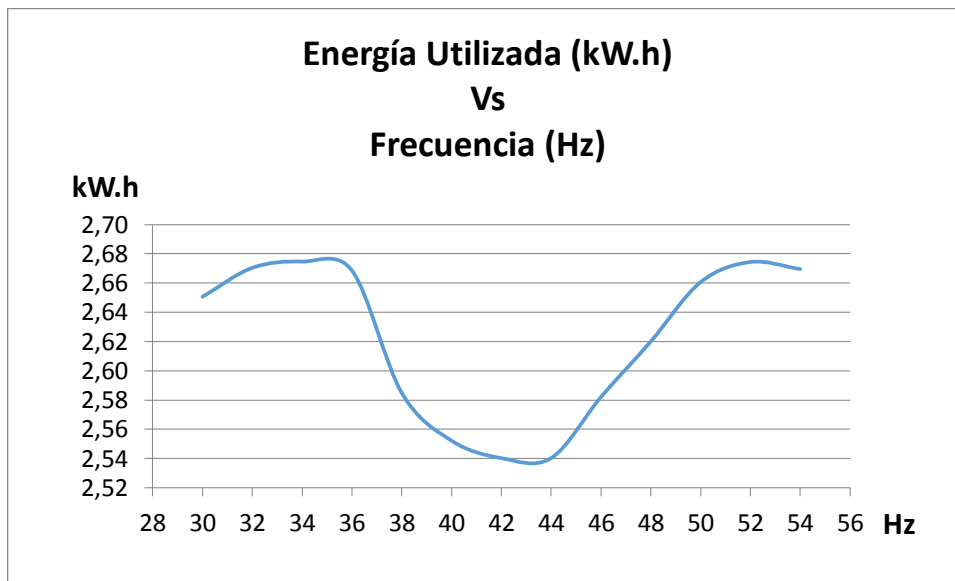
Para la manzana se utiliza un peso de 50 kg, se procede a realizar el experimento tanto para frecuencias por encima y por debajo de la frecuencia encontrada en el muestreo rápido que está cercana a los 45 Hz.

En la figura 20, se puede observar que el mayor porcentaje de polvo útil del total obtenido a la salida del molino en dependencia de la frecuencia aplicada al motor del molino, se da a una frecuencia aplicada al motor del molino de 46 Hz.



**Figura 20 Polvo útil /Total obtenido (%) Vs velocidad del motor de molino (Hz), manzana.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**



**Figura 21 Energía utilizada (kW.h) Vs frecuencia aplicada al motor del molino (Hz), manzana.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

En la figura 21 se observa que el consumo eléctrico mínimo se da a una frecuencia de alimentación al motor del molino cercana a 44 Hz.

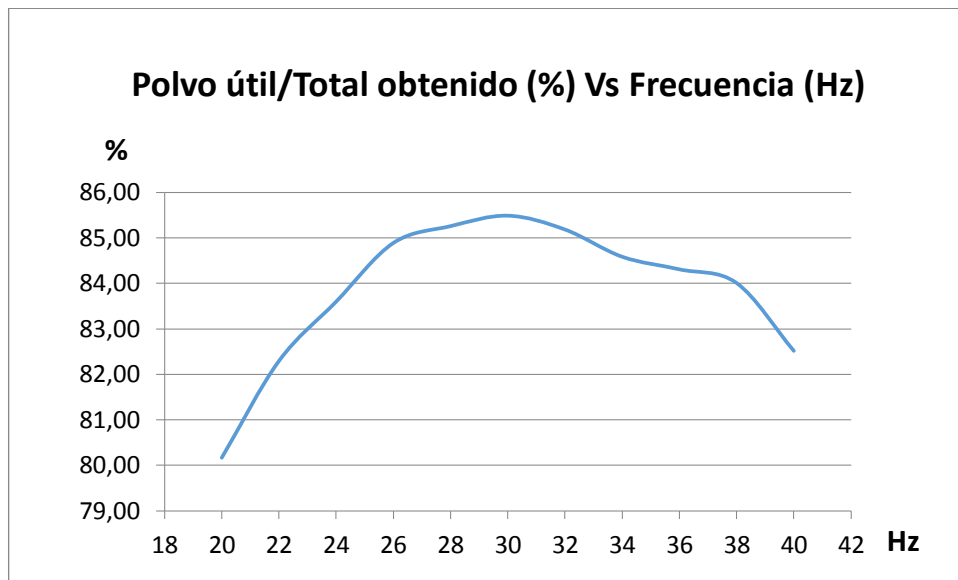
De los datos observados en las figuras 20 y 21 se concluye en el caso de la manzana, que para trabajar con la máxima eficiencia eléctrica posible y obtener la

mayor cantidad de producto con la calidad necesaria, se debe escoger una frecuencia de alimentación al motor del molino entre 44 y 46 Hz.

**Papaya:**

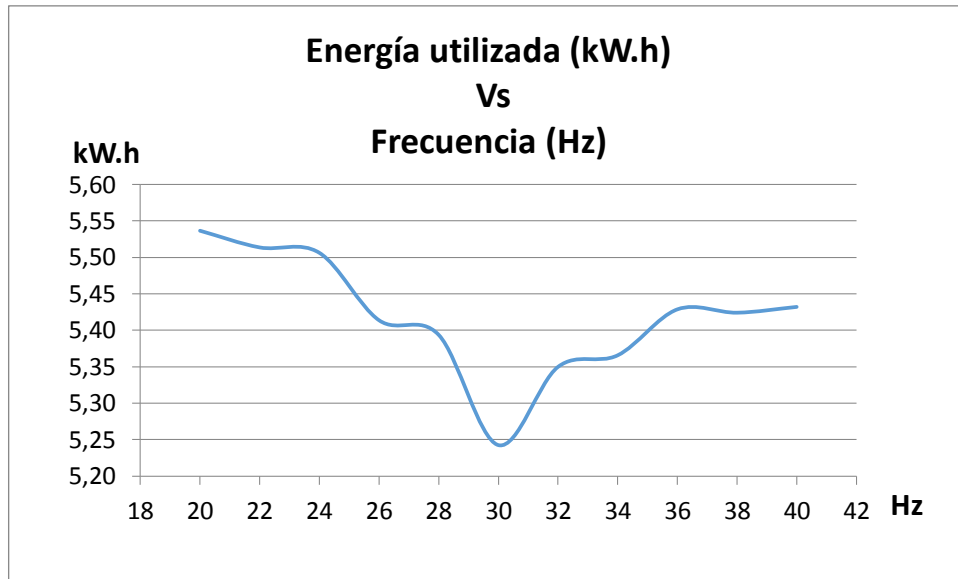
Para la papaya se utiliza un peso de 60 kg, se procede a realizar el experimento tanto para frecuencias por encima y por debajo de la frecuencia encontrada en el muestreo rápido que está cercana a los 28 Hz.

En la figura 22, se puede observar que el mayor porcentaje de polvo útil del total obtenido a la salida del molino en dependencia de la frecuencia aplicada al motor del molino, se da a una frecuencia aplicada al motor del molino de 30 Hz.



**Figura 22 Polvo útil /Total obtenido (%) Vs frecuencia aplicada al motor de molino (Hz), papaya.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**



**Figura 23** Energía utilizada (kW.h) Vs frecuencia aplicada al motor del molino (Hz), papaya.

Elaborado por: Silva Franklin 2015

En la figura 23 se observa que el consumo eléctrico mínimo se da a una frecuencia de alimentación al motor del molino cercana a 30 Hz.

De los datos observados en las figuras 22 y 23 se concluye en el caso de la papaya, que para trabajar con la máxima eficiencia eléctrica posible y obtener la mayor cantidad de producto con la calidad necesaria, se debe escoger una frecuencia de alimentación al motor del molino cercana a los 30 Hz.

### **3.3. Incidencia de corregir la velocidad de alimentación de producto**

Trabajar con la velocidad adecuada de alimentación del producto, definitivamente representa una mejora tanto en disminución de consumo de energía eléctrica, aseguramiento de la calidad del producto y ahorro económico. Para demostrar lo mencionado se procede a realizar el análisis en uno solo de los productos ya que lo mismo sucederá con los demás.

Se escoge la papaya para este análisis, la frecuencia con la que estaba trabajando es de 36 Hz y la frecuencia con la que debe trabajar es de 30 Hz. Para comprender de mejor manera se presenta la tabla 10, donde se pueden observar las mejoras

directas que se pueden obtener si se pasase de cualquier frecuencia a la frecuencia óptima de trabajo.

La línea con números en verde presentan un ahorro nulo, ya que representa el cambio de una frecuencia de trabajo igual a la frecuencia óptima, y la línea con números rojos son los cambios reales y de importancia ya que indica el cambio de la frecuencia con la que se encontraba trabajando a la frecuencia óptima.

Se toma como referencia una cantidad de producto de 400 kg, que es la capacidad que la empresa puede moler al día.

**Tabla 10 Mejora directa, en energía y costos al trabajar en el punto de máxima eficiencia**

| DATOS |                    |                 | MEJORA DIRECTA POR TRABAJAR EN EL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA |                          |                       |                                   |              |
|-------|--------------------|-----------------|--|--------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------|
| No.   | FRECUENCIA<br>(Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h)                                     | AHORRO DE ENERGÍA (Kw*h) | AHORRO DE ENERGÍA (%) | COSTOS DE ENERGÍA UTILIZADA (USD) | AHORRO (USD) |
| 1     | 20                 | 400,30          | 46,14  | 2,45                     | 5,31                  | 5,54                              | 0,29         |
| 2     | 22                 | 410,99          | 45,95  | 2,26                     | 4,92                  | 5,51                              | 0,27         |
| 3     | 24                 | 417,37          | 45,89  | 2,20                     | 4,79                  | 5,51                              | 0,26         |
| 4     | 26                 | 423,88          | 45,11  | 1,43                     | 3,16                  | 5,41                              | 0,17         |
| 5     | 28                 | 425,73          | 44,95  | 1,26                     | 2,80                  | 5,39                              | 0,15         |
| 6     | 30                 | 426,60          | 43,69  | 0,00                     | 0,00                  | 5,24                              | 0,00         |
| 7     | 32                 | 425,43          | 44,58  | 0,89                     | 2,01                  | 5,35                              | 0,11         |
| 8     | 34                 | 422,30          | 44,71  | 1,03                     | 2,30                  | 5,37                              | 0,12         |
| 9     | 36                 | 420,99          | 45,24  | 1,55                     | 3,43                  | 5,43                              | 0,19         |
| 10    | 38                 | 419,21          | 45,20  | 1,51                     | 3,35                  | 5,42                              | 0,18         |
| 11    | 40                 | 411,08          | 45,27  | 1,58                     | 3,49                  | 5,43                              | 0,19         |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

Por tanto de la tabla 10, se puede observar que al pasar de la frecuencia de trabajo anterior a la frecuencia de trabajo óptima, se obtiene un ahorro de energía diario de 3,43 %, lo que representa un ahorro en dólares de tan solo 19 centavos.



Al trabajar con la frecuencia de operación óptima, se obtiene un aumento en la cantidad de polvo útil, este aumento representa un ahorro en energía eléctrica y por ende un ahorro en dinero.

La tabla 11 nos muestra las mejoras por el aumento de polvo útil; se deben tomar las mismas consideraciones que en la tabla 10, sobre los números en verde y rojo.

**Tabla 11 Mejora por aumento de polvo útil, en energía y costos al trabajar en el punto de máxima eficiencia.**

| DATOS |                 |                 | MEJORA POR AUMENTO DE POLVO ÚTIL |                            |   |  |
|-------|-----------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------|---|--|
| No.   | FRECUENCIA (Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h)         | AUMENTO EN POLVO UTIL (kg) | AHORRO POR AUMENTO DE POLVO ÚTIL (Kw*h) | AHORRO POR AUMENTO DE POLVO ÚTIL (USD) |
| 1     | 20              | 400,30          | 46,14                            | 26,30                      | 3,03                                    | 0,36                                   |
| 2     | 22              | 410,99          | 45,95                            | 15,60                      | 1,74                                    | 0,21                                   |
| 3     | 24              | 417,37          | 45,89                            | 9,22                       | 1,01                                    | 0,12                                   |
| 4     | 26              | 423,88          | 45,11                            | 2,71                       | 0,29                                    | 0,03                                   |
| 5     | 28              | 425,73          | 44,95                            | 0,86                       | 0,09                                    | 0,01                                   |
| 6     | 30              | 426,60          | 43,69                            | 0,00                       | 0,00                                    | 0,00                                   |
| 7     | 32              | 425,43          | 44,58                            | 1,17                       | 0,12                                    | 0,01                                   |
| 8     | 34              | 422,30          | 44,71                            | 4,30                       | 0,45                                    | 0,05                                   |
| 9     | 36              | 420,99          | 45,24                            | 5,61                       | 0,60                                    | 0,07                                   |
| 10    | 38              | 419,21          | 45,20                            | 7,39                       | 0,80                                    | 0,10                                   |
| 11    | 40              | 411,08          | 45,27                            | 15,52                      | 1,71                                    | 0,21                                   |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

En este caso el ahorro diario al cambiar a la frecuencia óptima de operación, es de 0,6 kW.h y de 7 centavos de dólar.

Finalmente en la tabla 12 se observa las mejoras totales que se pueden obtener al trabajar en el punto de máxima eficiencia tanto diario como mensual, de igual manera se debe utilizar las mismas consideraciones para los números en verde y rojo que en los casos anteriores.

**Tabla 12 Mejora por aumento de polvo útil, en energía y costos al trabajar en el punto de máxima eficiencia**

| DATOS |                |                 | MEJORA TOTAL POR TRABAJAR EN EL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA |                                |                             |                    |                            |
|-------|----------------|-----------------|--|--------------------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|
| No.   | VELOCIDAD (Hz) | POLVO ÚTIL (kg) | ENERGÍA UTILIZADA (kW*h)                                   | AHORRO TOTAL DE ENERGÍA (Kw*h) | AHORRO TOTAL DE ENERGÍA (%) | AHORRO TOTAL (USD) | Ahorro total mensual (USD) |
| 1     | 20             | 400,30          | 46,14  | 5,48                           | 11,88                       | 0,66               | 13,16                      |
| 2     | 22             | 410,99          | 45,95  | 4,00                           | 8,71                        | 0,48               | 9,61                       |
| 3     | 24             | 417,37          | 45,89  | 3,21                           | 7,00                        | 0,39               | 7,71                       |
| 4     | 26             | 423,88          | 45,11  | 1,72                           | 3,80                        | 0,21               | 4,12                       |
| 5     | 28             | 425,73          | 44,95  | 1,35                           | 3,01                        | 0,16               | 3,24                       |
| 6     | 30             | 426,60          | 43,69  | 0,00                           | 0,00                        | 0,00               | 0,00                       |
| 7     | 32             | 425,43          | 44,58  | 1,02                           | 2,28                        | 0,12               | 2,44                       |
| 8     | 34             | 422,30          | 44,71  | 1,48                           | 3,31                        | 0,18               | 3,56                       |
| 9     | 36             | 420,99          | 45,24  | 2,15                           | 4,76                        | 0,26               | 5,17                       |
| 10    | 38             | 419,21          | 45,20  | 2,31                           | 5,11                        | 0,28               | 5,55                       |
| 11    | 40             | 411,08          | 45,27  | 3,29                           | 7,26                        | 0,39               | 7,89                       |

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

En la tabla 12 se observa una reducción en energía de 2.7 kWh que representa el 4,76 % del total utilizado inicialmente lo cual da un ahorro mensual de 5,17 USD.

Se puede notar también que si por error se trabaja por ejemplo a una frecuencia de 20 Hz, al cambiar a la frecuencia de trabajo óptima, el ahorro sería de 11, 88 % en energía eléctrica y un ahorro económico de 13,16 USD mensual.

Se debe entender que si bien el ahorro económico es poco, éste crece al aumentar la producción, sin embargo el ahorro energético es considerable.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. PROPUESTA**

#### **4.1. Título de la propuesta**

Diseño de un sistema automatizado para el control de la velocidad de alimentación de los productos deshidratados al molino de martillos para mejorar la eficiencia energética en la Empresa Aromas del Tungurahua.

#### **4.2. Justificación de la propuesta**

En la actualidad uno de los problemas más graves en la industria es el consumo de energía eléctrica. Todos los países incentivan su ahorro, para disminuir el consumo de energía eléctrica, la única solución es la de aumentar la eficiencia en todos los sistemas que consumen electricidad.

Es por tanto indispensable que todos los procesos utilizados en las industrias, trabajen en un punto que permitan obtener la mayor eficiencia posible.

La empresa Aromas de Tungurahua, debe trabajar con procesos altamente eficientes, caso contrario, estaría malgastando la energía eléctrica, produciendo menos de lo que su capacidad permite, lo cual produce pérdidas económicas que podrían afectar la competitividad la empresa.

#### **4.3. Objetivo de la propuesta**

##### **4.3.1. Objetivo general**

Diseñar el control automático de la velocidad de alimentación de los productos deshidratados al molino de martillos para mejorar la eficiencia en la Empresa Aromas del Tungurahua.

#### **4.3.2. Objetivos específicos**

- Diseñar un módulo de acondicionamiento de señal que reciba datos de un sensor de corriente y lo convierta en señales detectables adecuadas para la entrada del lazo de control.
- Diseñar un lazo de control cerrado PID, que permita mantener la velocidad de alimentación de producto al molino en base a la detección del consumo de corriente del motor del molino.
- Diseñar un tablero de control que contenga todas las partes del sistema de control e indicadores del estado del proceso.
- Diseñar el sistema de control automático de la velocidad de alimentación de los productos deshidratados al molino de martillos que permita mejorar la eficiencia eléctrica en el proceso de molienda.

#### **4.4. Estructura de la propuesta**

La propuesta consiste en el diseño y simulación de un sistema de control para controlar la cantidad de producto que ingresa al molino constando de los siguientes elementos:

- Sistema de medición de la corriente del molino de matillos.
- Controlador PID, interno en un PLC.
- Sistema de control en lazo cerrado, que permite, dependiendo del producto a medir, seleccionar la velocidad de alimentación del producto al molino. Este sistema además supervisa y corrige de ser necesario, la velocidad de alimentación de producto, midiendo la corriente que demanda el motor del molino.

## 4.5. Desarrollo de la propuesta

### 4.5.1. Diseño del sistema automático

Para el diseño del sistema automático de control de velocidad de alimentación del producto al molino de martillos, se parte de los datos obtenidos para el producto PAPAYA, al conocer la cantidad de producto utilizado en cada experimento y el tiempo que éste demora, se puede calcular la velocidad de alimentación de producto para cada frecuencia del voltaje aplicado al motor del tornillo de arrastre. Si se toma esta información, se puede notar claramente que la corriente tiene dependencia de la velocidad del producto, es decir que si se mide la corriente del molino del martillo, se está determinando la velocidad de alimentación del producto. Tabla 13.

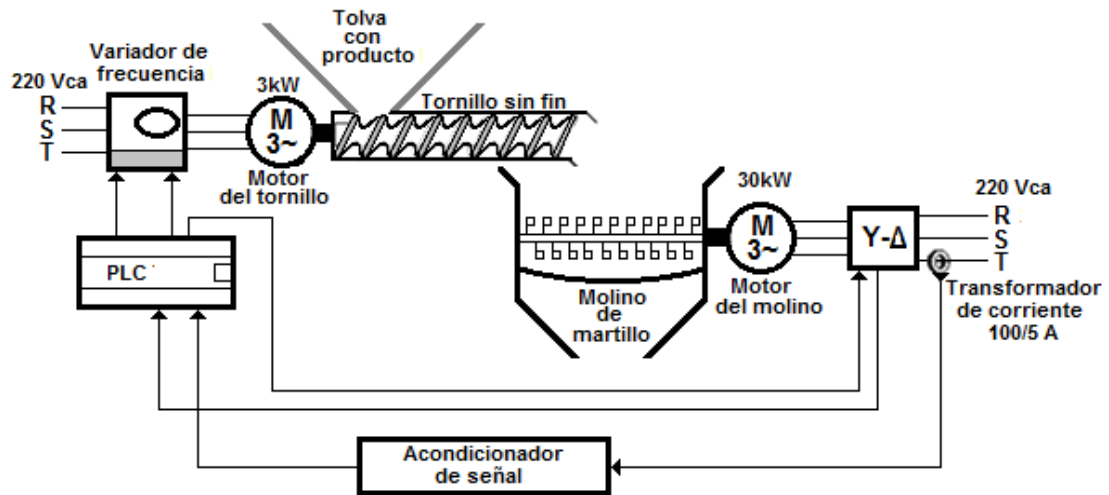
**Tabla 13 Corriente del motor del molino del martillo en función de la velocidad de alimentación del producto al molino.**

| No. | FRECUENCIA<br>(Hz) | CANTIDAD DE<br>PRODUCTO POR<br>UNIDAD DE TIEMPO<br>(g/s) | CORRIENTE<br>(A) |
|-----|--------------------|--|------------------|
| 1   | 20                 | 41,29  | 36,0             |
| 2   | 22                 | 41,70  | 36,2             |
| 3   | 24                 | 42,67  | 37,0             |
| 4   | 26                 | 44,58  | 38,0             |
| 5   | 28                 | 44,98  | 38,2             |
| 6   | 30                 | 47,24  | 39,0             |
| 7   | 32                 | 48,08  | 40,5             |
| 8   | 34                 | 49,71  | 42,0             |
| 9   | 36                 | 50,42  | 43,1             |
| 10  | 38                 | 51,28  | 43,8             |
| 11  | 40                 | 52,49  | 44,9             |

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

El sistema de control por tanto, permite seleccionar la velocidad adecuada de alimentación de cada producto y con la ayuda de la medición de la corriente del motor del molino, controlar que esta permanezca constante.

El nuevo sistema de control automático de la alimentación de producto al molino de la Empresa Aromas del Tungurahua consta de los elementos especificados en la figura 24, los cuales deben conformar el proceso.



**Figura 24 Representación del proceso**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

El sistema parte de la tolva de producto de donde ingresa el material hacia el tornillo de arrastre movido por un motor de 3 kW, que se encarga de dosificar el material que a su vez ingresa al molino de martillos accionado por un motor de 30 kW.

El sistema electrónico que se pretende adicionar, consta de un transformador de corriente para medir la corriente del motor del molino, la cual refleja la velocidad de alimentación del molino ver tabla 12, un circuito acondicionador de señal, un PLC para el control que cumple la función PID que junto con una entrada analógica recibe y entrega las señales al proceso y a un variador de velocidad conectado al motor trifásico del tornillo.

Procedimiento de operación para la implementación de la propuesta:

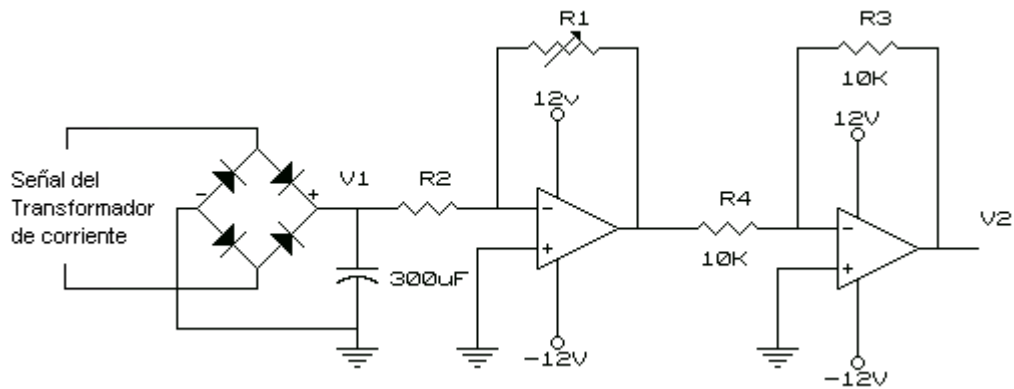
- 1) Cuando arranca el proceso, el motor de 30 kW del molino realiza su arranque controlado por el PLC.

- 2) Al finalizar el arranque, el PLC activa el controlador PID, el mismo que enviará una señal de control hacia el variador, que hará arrancar al motor de 3 kW del tornillo.
- 3) La función PID se encarga que el producto arrastrado por el tornillo sea suficiente para que el molino alcance su punto de máxima eficiencia acorde al producto a moler, lo cual se selecciona mediante recetas incluidas en el PLC.
- 4) El transformador de corriente de 100 a 5 inicia la realimentación del lazo, la lectura que se obtiene de este, entra hacia el acondicionador de señal que varía el rango de 0 – 100 amperios a una señal más manejable para el PLC, de 0 a 10 voltios.
- 5) En base a la medición de la corriente del proceso el controlador PID, determinará si se debe incrementar o decrementar la velocidad del tornillo para seguir manteniendo la consigna.
- 6) Cuando el grano de la tolva se termine, el controlador detectará una reducción significativa en la corriente de consumo del motor del molino, por lo que procederá a detener el proceso, de la siguiente forma: Hace girar el tornillo de arrastre por un minuto más, para asegurarse que el tornillo está vacío y entonces lo apaga. Mientras tanto sigue haciendo girar el motor del molino, e incluso después continua haciéndolo girar por tres minutos, para asegurarse de que se ha terminado de moler todo el grano.
- 7) Finalmente el motor del molino se detiene.
- 8) El procedimiento de parada del proceso se realiza de la misma forma, cuando se solicite paro a través del pulsador de apagado.
- 9) El proceso se detiene inmediatamente cuando se han activado alguno de los sensores de paro de emergencia.

#### **4.5.2. Diseño del módulo de acondicionamiento de señal**

La señal obtenida del transformador de corriente, debe ser transformada a la señal estándar que acepta la entrada analógica del PLC (0-10V), para esto se ha

diseñado un circuito de acondicionamiento de señal cuya gráfica se puede ver a continuación, figura 25:



**Figura 25 Circuito de acondicionamiento de señal.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

El circuito consta de un puente rectificador y un condensador para convertir la corriente alterna en continua, esta señal una vez rectificada es introducida a un circuito amplificador cuya salida dependerá del voltaje de entrada y de la ganancia resultante de  $R1/R2$ , R1 es un potenciómetro que actúa como resistencia variable y sirve para dicha regulación.

Para alimentar a este circuito electrónico, se requiere de una fuente de 12Vcd.

#### **4.5.3. Programación de equipos**

El proceso consta de dos equipos que requieren ser programados:

El variador de frecuencia, en el cual sus parámetros deben ser seleccionados de acuerdo al proceso donde éste vaya a ser utilizado.

Y el PLC, que requiere de la elaboración de un programa, que determina cada uno de los pasos que debe seguir el proceso para funcionar correctamente, además de controlar en este caso específico la velocidad de alimentación de producto al molino de martillos.



## Programación del Variador de Frecuencia.

El variador es un dispositivo, toma la energía alterna trifásica de la red con una frecuencia fija de 60 Hz, entrega a su salida energía alterna trifásica con frecuencia variable, en este caso de cero a 60 Hz, la cual es alimentada al motor del tornillo de arrastre para controlar la velocidad de alimentación de producto al molino.

Los variadores de frecuencia requieren que por los menos un grupo de parámetros sean seleccionados de acuerdo a la necesidad, por ejemplo; la potencia del motor, el voltaje de alimentación, tiempo de arranque, tiempo de parada y otros más.

Estos dispositivos tienen a su vez un sistema de programación rápida donde se puede seleccionar un grupo completo de parámetros para una aplicación específica. En este caso se seleccionan los parámetros para un motor que trabaje como transportador, tomando muy en cuenta que se requiere que éste reaccione lo más pronto posible, por lo que lo importante de su programación, son los tiempos de arranque y parada, los cuales se seleccionan para tres segundos.

A continuación se indican la descripción de algunos de sus parámetros y sus valores, cabe mencionar que algunos variadores tienen muchos parámetros (más de cien), por lo que se indican solo los más relevantes. Ver tabla 14.

**Tabla 14 Descripción y valores de los parámetros del variador.**

| Número       | Nombre   | Descripción  |
|--------------|--|--|
| <b>A1-02</b> | Selección de método de control                 | 0: Control de voltaje proporcional a la frecuencia |
| <b>C1-01</b> | Tiempo de aceleración                          | 3 s  |
| <b>C1-02</b> | Tiempo de desaceleración                       | 3 s  |
| <b>C6-01</b> | Relación de trabajo                            | 0: Trabajo fuerte                                  |
| <b>L3-04</b> | Selección de prevención durante desaceleración | 1: Habilitado                                      |
| <b>b1-04</b> | Selección de operación reversa                 | 1: Reversa prohibida                               |
| <b>T1-02</b> | Potencia del motor                             | 3.00: 3kW  |
| <b>T1-03</b> | Voltaje del motor                              | 220.0: 220 voltios                                 |
| <b>T1-05</b> | Frecuencia de trabajo del motor                | 60.00 : 60 Hz                                      |

Elaborado por: Silva Franklin 2015

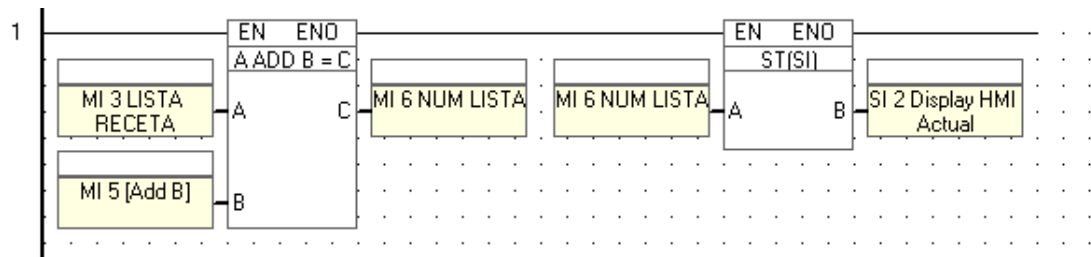
## Programación del PLC

A continuación se presenta el programa del PLC, se ha preferido la utilización del método de programación LADDER por su flexibilidad respecto a la utilización de sus instrucciones.

El PLC a ser utilizado es el JAZZ de UNITRONICS modelo JZ10-11-UA24 debido a que cuenta con pantalla de interacción (HMI) incluida en su estructura y es sencillo de manejar, por ser de bajo costo posee limitaciones pero es suficiente para realizar este trabajo. Anexo G.

El programa tiene la siguiente estructura:

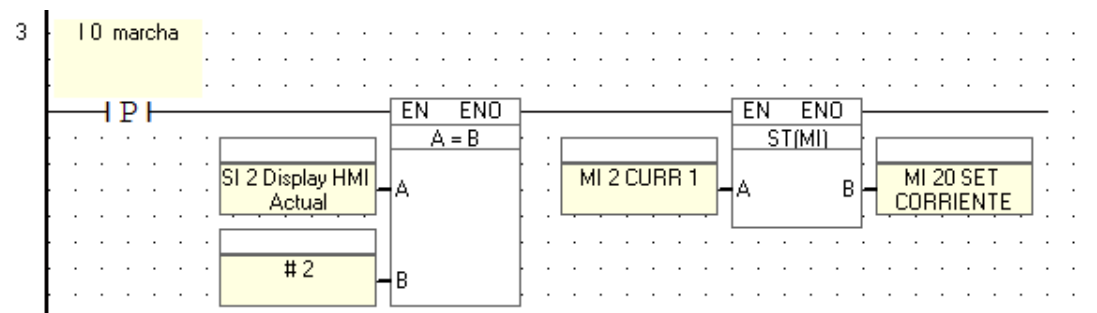
Se inicializan las pantallas a ser usadas



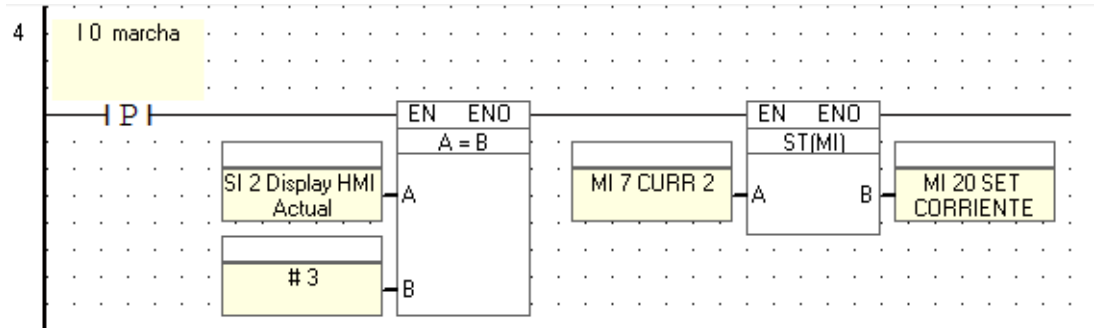
Permite la opción de arrancar el sistema utilizando las teclas del PLC



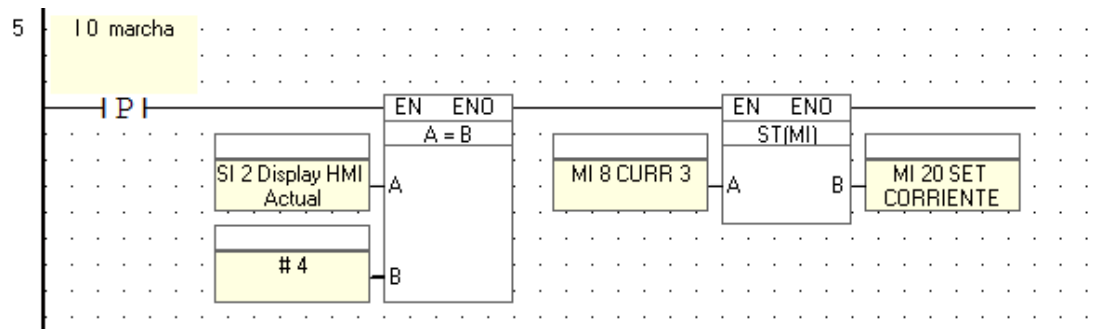
Enciende el sistema y presenta la pantalla donde se selecciona la corriente de trabajo dependiendo del producto a ser molido, en este caso es la papaya.



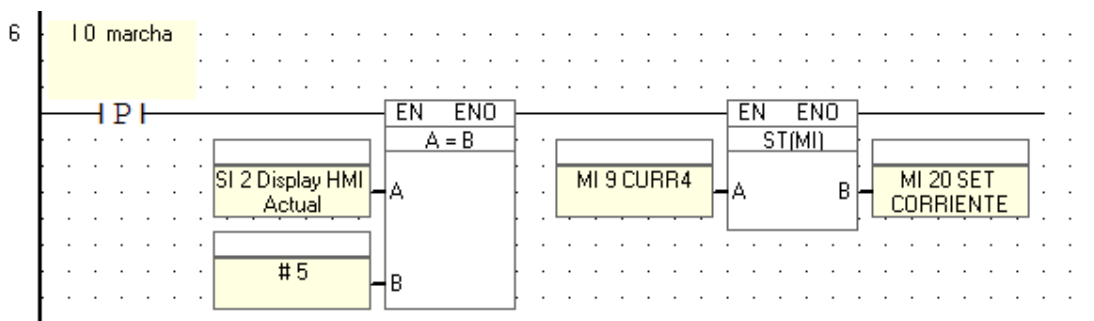
Enciende el sistema y presenta la pantalla donde se selecciona la corriente de trabajo dependiendo del producto a ser molido, en este caso es la manzana.



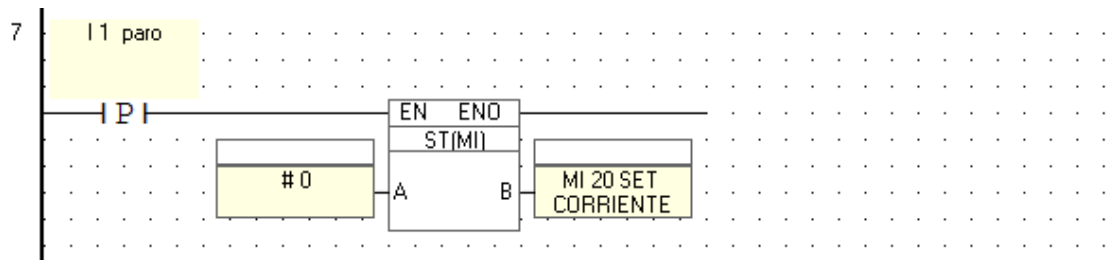
Enciende el sistema y presenta la pantalla donde se selecciona la corriente de trabajo dependiendo del producto a ser molido, en este caso es la alfalfa.



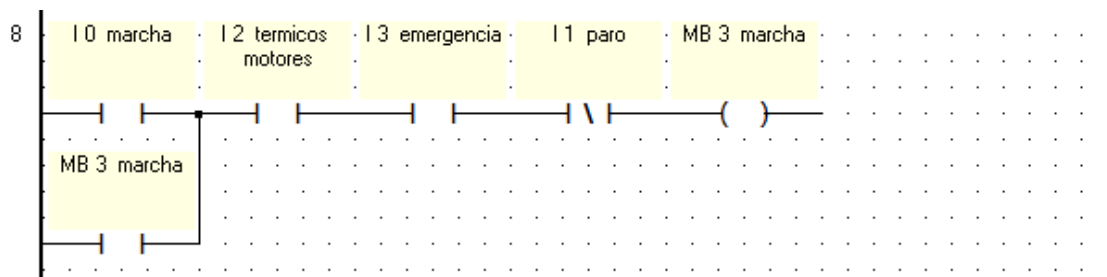
Enciende el sistema y presenta la pantalla donde se selecciona la corriente de trabajo dependiendo del producto a ser molido, en este caso es durazno.



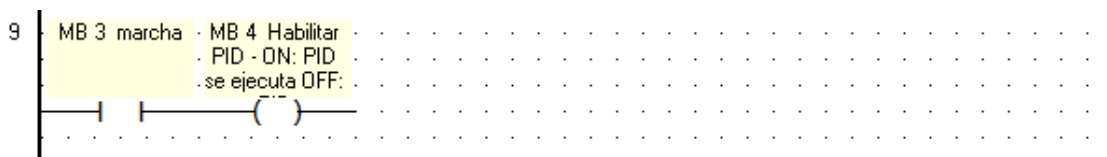
Apaga el proceso y resetea la consigna de corriente para que pueda ser seleccionada en un arranque posterior.



Arranque del proceso.



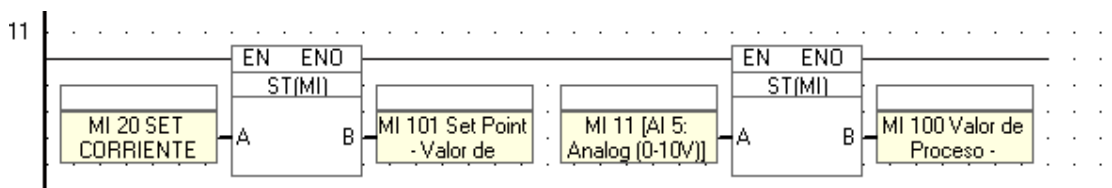
Habilita el controlador PID



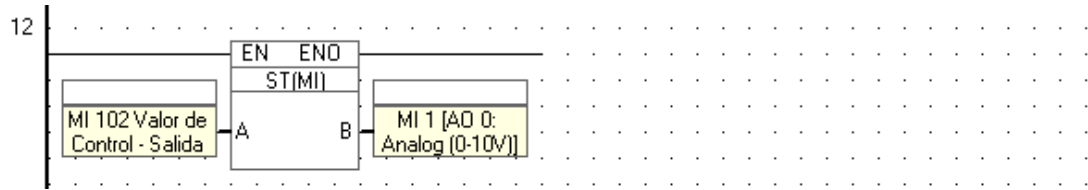
Permite mediante programación, seleccionar el tipo de salida del controlador PID, ya sea directa o inversa.



Ingresa el valor de corriente seleccionado y el valor medido al control PID.



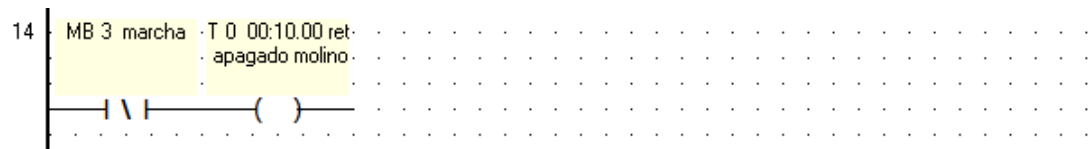
Asigna a una salida analógica la salida del control PID.



Arranque del motor del molino



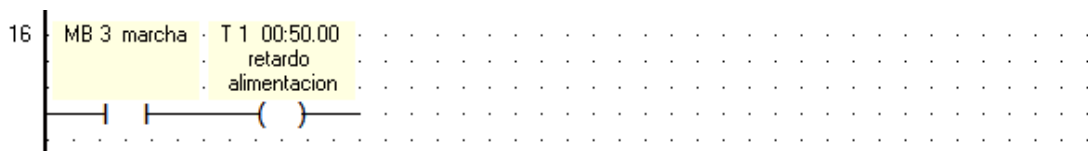
Temporizador que genera el retardo al apagado del motor del molino



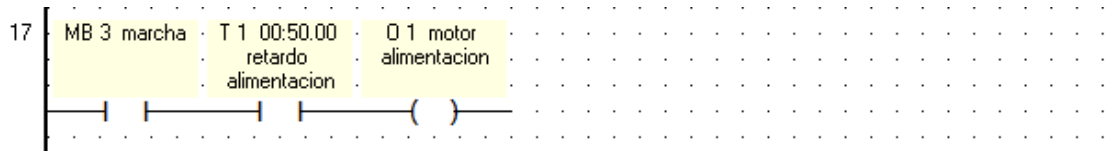
Apagado del motor del molino, con retardo si es apagado normal, e inmediato si el apagado es por falla.



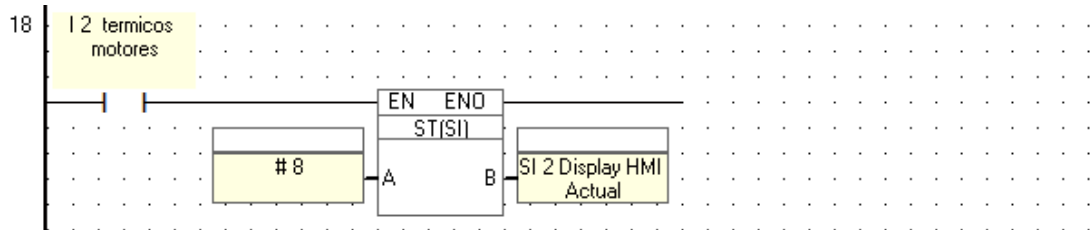
Temporizador que genera el retardo del encendido del motor del tornillo de alimentación de producto.



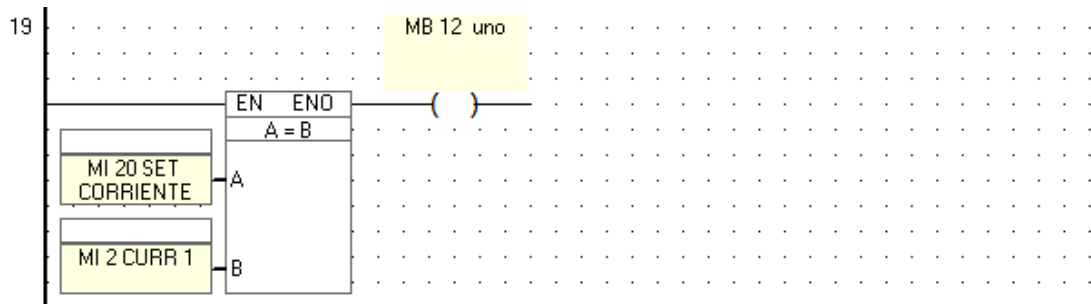
Encendido del motor del tornillo de alimentación de producto.



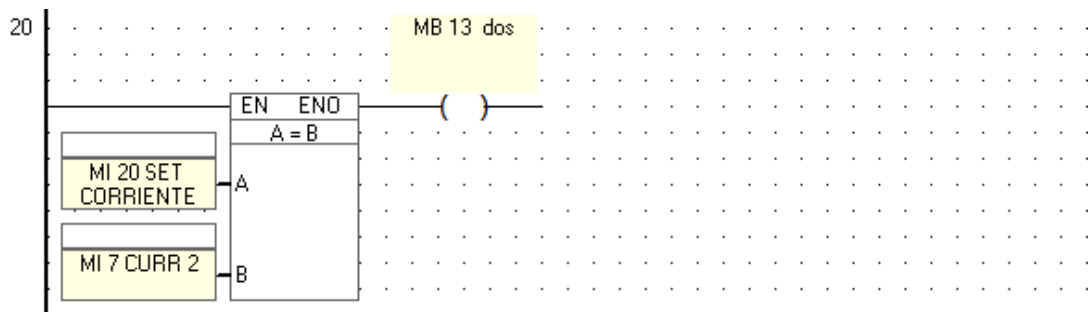
Despliega una pantalla con indicación de fallo en caso de falla en los motores.



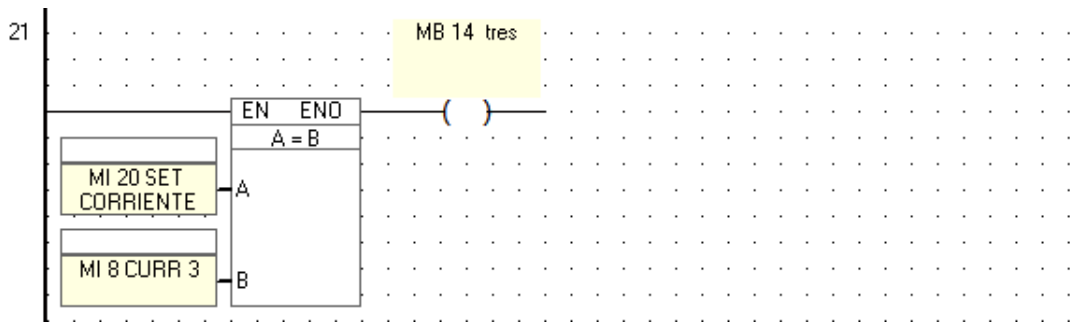
Despliega el número uno en pantalla para asegurar que se está trabajando con producto papaya.



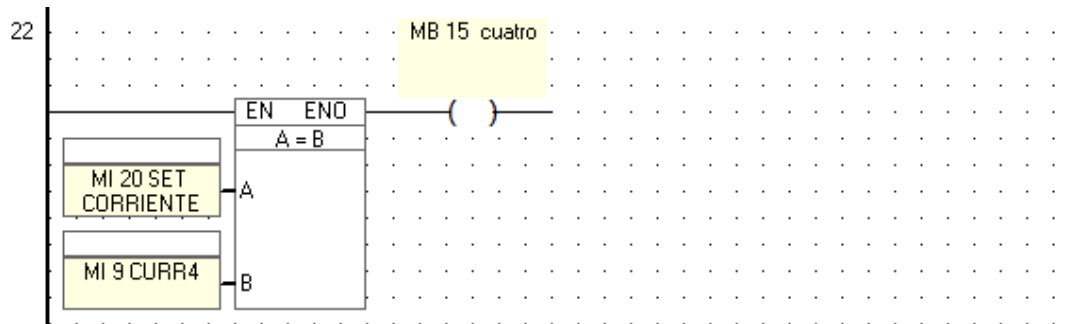
Despliega el número dos en pantalla para asegurar que se está trabajando con producto manzana.



Despliega el número tres en pantalla para asegurar que se está trabajando con producto alfalfa.



Despliega el número cuatro en pantalla para asegurar que se está trabajando con producto durazno.



El PLC JAZZ cuenta con su propia pantalla que posee dos líneas con un máximo de 16 caracteres cada una, figura 26.



**Figura 26 PLC JAZZ**

**Fuente:** (UNITRONICS, 2015)

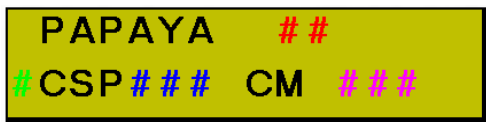
Las pantallas que se programan son las siguientes:

Pantalla inicial, se deben utilizar los cursores para desplazarse hacia las pantallas de recetas.



TRITURADORA  
MENU RESETAS ~

Pantalla de receta, existe una para cada producto, donde se visualiza: El nombre del producto y el número que confirma que se está trabajando con ese producto, CSP que es la corriente seleccionada y CM que es la corriente medida.



PAPAYA ##  
#CSP### CM ###

Por último la pantalla que aparece cuando los térmicos se accionan por una falla en los motores.



FALLA DE  
MOTORÉS

#### 4.5.4. Diseño del tablero de control

La conexión de los elementos del automatismo se realiza en un tablero metálico de 60x50 cm que permite una disposición adecuada de los componentes, una buena disipación de calor que al mismo tiempo es apropiadamente hermético para reducir la polución debido a que el ambiente de trabajo está lleno de partículas procedentes de los productos utilizados en la molienda.

En la figura 26, se presenta la disposición de elementos dentro del tablero, adicional a los dispositivos analizados anteriormente, se instalarán, dos fusibles con portafusibles para la protección del PLC, un relé térmico trifásico para la protección del variador de velocidad, que al mismo tiempo servirá como interruptor del mismo, y una fuente de energía que se utiliza para polarizar el circuito del acondicionador de señal (+12Vcd, -12Vcd y Gnd).



Para la instalación física de los elementos se han seguido las recomendaciones técnicas indicadas en el manual del PLC, son las siguientes:

- Los sistemas de automatización se disponen en un armario eléctrico en un raíl DIN estándar. Es posible montarlos de forma horizontal o vertical.
- Para el PLC se ha previsto la ventilación por convección natural. Por lo tanto, se ha dejado un margen mínimo de 25 mm por encima y por debajo de las unidades para garantizar su ventilación.
- Al planificar la disposición de los módulos, se ha previsto suficiente espacio para la utilización de canaletas para el cableado de las entradas y salidas, así como para las conexiones de los cables de alimentación y comunicación.
- Se han seleccionado cables con una sección adecuada para la intensidad de corriente del diseño. Los PLCs aceptan cables con sección de  $1.50 \text{ mm}^2$  a  $0,50 \text{ mm}^2$  (14 AWG a 22 AWG). Para esta aplicación se ha utilizado cable 18 AWG.
- Se ha separado el cableado de corriente alterna y el cableado de corriente continua de alta tensión y rápida conmutación de los cables de señal de baja tensión, para evitar ruido eléctrico en las señales de control.

Los fusibles y los relés térmicos se encuentran montados en rieles DIN que facilitan su manipulación, el PLC está empotrado en la parte frontal del tablero. La disposición física de los elementos dentro del tablero es la siguiente:

En la puerta del tablero se han montado un amperímetro de 0 a 100 amperios que servirá para visualizar la corriente del motor del molino y representa el estado de la variable dinámica del proceso.

Se ha colocado un voltímetro de 0 a 300 Vca con su respectivo selector para visualizar el voltaje de las fases RS – ST – TR. Además se ha colocado un selector para modo manual y automático.

Su disposición se presenta en las figuras 27 Y 28:

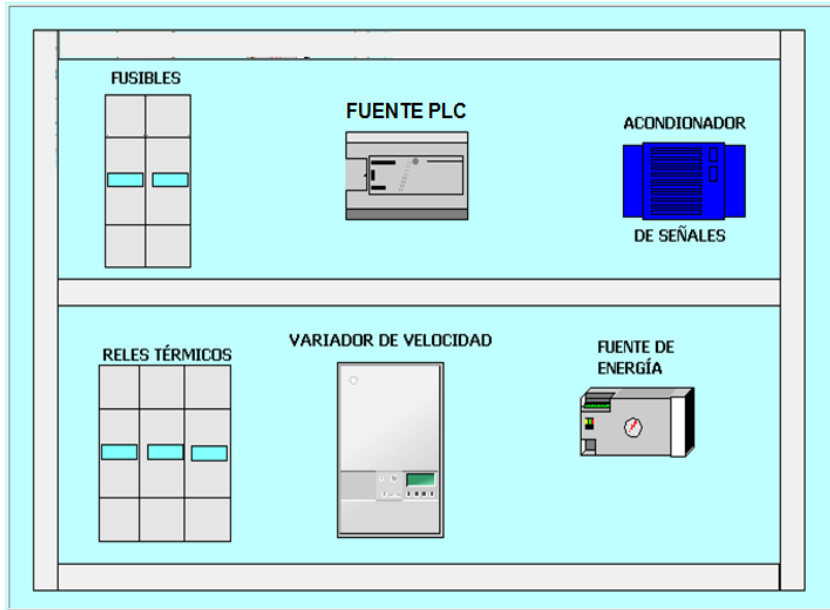


Figura 27 Disposición física de los elementos dentro del tablero.

Elaborado por: Silva Franklin 2015



Figura 28 Disposición física de los elementos en la parte frontal del tablero.

Elaborado por: Silva Franklin 2015

#### 4.5.5. Análisis de costos

##### Estructura del nuevo sistema

Para solucionar el problema de dosificación de material al molino de martillos, expuesto en los capítulos anteriores, luego de hacer un exhaustivo análisis respecto a su factibilidad, costos y seguridad, se llega a la conclusión que es necesaria la implementación de un sistema automático de control que permita ingresar a la cámara del molino una cantidad constante de producto sin la intervención directa de los obreros, para conseguir que el molino trabaje en su punto de máxima eficiencia.

Para realizar este proceso de entre las varias alternativas de solución y por las facilidades, seguridad, costos y experiencia en la planta se decide controlar la velocidad del tornillo de arrastre como elemento mecánico para trasladar el producto desde el silo de recepción hacia el molino de martillos, que además de realizar esta función dosifique las cantidades exactas que el molino tiene capacidad de procesar controlando su velocidad de acuerdo a cada producto. El esquema mecánico se puede observar en la figura 29.

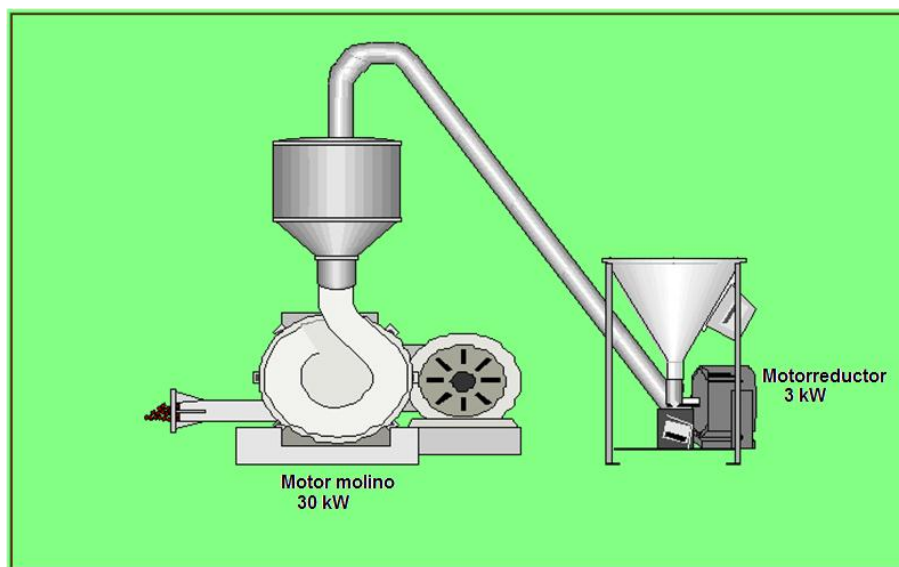
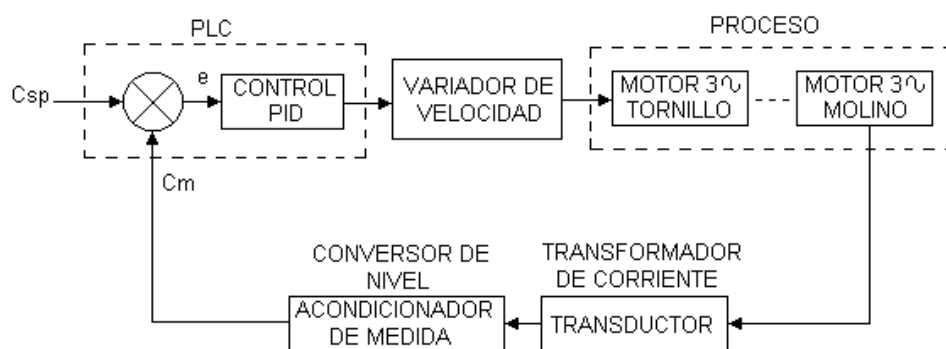


Figura 29 Esquema mecánico del proceso automático

Elaborado por: Silva Franklin 2015

Como elemento de control se decide utilizar un PLC con pantalla además de entradas y salidas analógicas, y un variador de frecuencia que finalmente alimentará al motor reductor. En conclusión la idea es medir la corriente de consumo en una de las fases del motor de 30 kW y a través de un acondicionador entregar una señal capaz de manejar un sistema que controle la velocidad del motor que alimenta al tornillo dosificador.

Para la automatización del proceso se ha previsto la implementación de un lazo de control de proceso como se observa en la figura 30:



**Figura 30 Lazo de control para el sistema de molienda**

Elaborado por: Silva Franklin 2015

Luego de haber sido analizados cada uno de los elementos del lazo de control de proceso, se procederá al análisis económico del sistema. Tabla 15.

**Tabla 15 Lista de materiales y su costo**

| <b>MATERIAL</b>                                   | <b>COSTO</b> |
|---|--------------|
| Un transformador de corriente marca Siemens 100/5 | 22           |
| Un circuito acondicionador de señal               | 20           |
| Un PLC JAZZ                                       | 420          |
| Un Amperímetro analógico                          | 50           |
| Un voltímetro                                     | 50           |
| Interruptores y pulsadores                        | 60           |
| Un tablero de 60x50 cm                            | 50           |
| Canaletas   | 50           |
| Cable de conexión                                 | 40           |
| Elementos de protección                           | 90           |
| Otros materiales                                  | 15           |
| Mano de Obra y costos de diseño                   | 1 800        |
| <b>TOTAL:</b>                                     | <b>2 667</b> |

Elaborado por: Silva franklin 2015

#### **4.5.6. Evaluación socio-económico-ambiental de la propuesta**

##### **En lo social**

Este proyecto contribuye además de un ahorro energético, a dar un trabajo más cómodo y seguro a los operarios, puede disminuir los costos de los productos, disminuye el gasto energético y por ende la contaminación, por lo que se considera que existe un aporte social al realizarlo.

##### **En lo económico**

Se realiza el análisis para el caso de la papaya donde se observa que al trabajar en el punto de máxima eficiencia se puede obtener un ahorro del 4,76 % en energía eléctrica utilizada.

El ahorro económico es de 5.17 USD mensual, el cual al parecer es bajo, pero se debe considerar que también existe un aumento en la producción de 5.61 kg diarios de polvo útil, considerando 10 días de molienda durante el mes nos da un aumento mensual de 56.1 kg de polvo útil. En el mercado nacional por ejemplo cada caja de té de 25 gramos se vende por un valor medio de 1.5 USD, es decir que un kg se valoraría en 60 USD, si se toma en cuenta que la comercialización y el transporte consumen gran parte de éste valor y si se considera tan solo como ganancia en la producción de un sexto, es decir 10 USD por cada kg, se obtiene 561 USD de ganancia mensual, más los 5.17 USD de ganancia en ahorro energético, nos da una ganancia total de 566.17 USD.

Por tanto con un ingreso mensual adicional a la empresa de 566.17 USD y un tiempo de vida útil del proyecto de 60 meses (5 años), una inversión de 2 667 USD, un interés sobre la inversión de 0.95 mensual, se obtiene:

TIR = 21.23 %

VAN = 23 143.261 USD

Tiempo de retorno inferior a los cinco meses.

Es decir que el proyecto es rentable, más aun si se aumenta la producción, ya que de hacerlo el tiempo de recuperación será de muy pocos meses.

## **En lo ambiental**

Al disminuir el consumo energético es inevitable disminuir la contaminación ambiental, y al instalar un sistema automático se puede aislar de mejor manera el proceso, pues requiere menos de la participación humana, lo cual involucra también una disminución de contaminación por polvo resultado del desecho de la molienda.

### **4.6. Verificación de la propuesta**

El sistema propuesto es un automatismo que al controlar la velocidad de alimentación de producto hacia el molino de martillos hace que éste trabaje a su punto de mayor eficiencia energética manteniendo la calidad del producto final.

La implementación no ha sido posible, debido a que la empresa desea esperar a cambiarse de local para realizar nuevas inversiones ya que el cambio involucra aumento de producción y eso representa requerimientos diferentes a los actuales.

Los sistemas automáticos son altamente confiables y han sido probados innumerables veces, sin embargo de esto, para comprobar que la propuesta es funcional y válida, al no ser posible su implementación se procede a realizar su modelación y simulación, para ello se utiliza el Software MatLab con la ayuda de Excel.

#### **4.6.1. Modelado matemático del sistema automático de molienda**

Para el modelado se busca la función de transferencia del sistema constituido por el variador de frecuencia, el motor de tornillo, el tornillo de alimentación de producto y el molino de martillos, la variable de entrada  $r_{(t)}$  es el voltaje de control que se ingresa al variador y está entre cero y diez voltios (0;10 Vcd), y la salida  $c_{(t)}$  es la corriente que consume el motor de martillos y varía entre cero hasta aproximadamente 60 amperios (0;60 Aca). El diagrama de bloques del sistema total se puede observar en la figura 31.

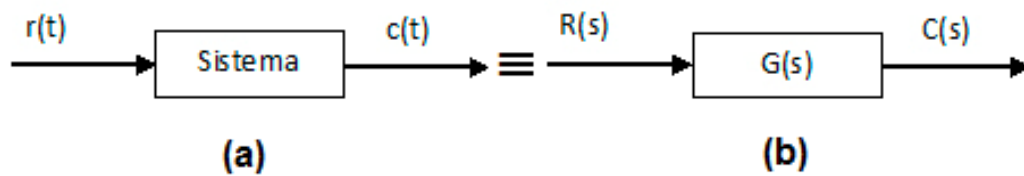


Figura 31 Representación en diagrama de bloques de un sistema con una entrada y una salida, (a): representación en el dominio del tiempo y (b): representación en el dominio de la frecuencia compleja.

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

Dónde:

$r(t)$  es la entrada al sistema, en este caso el voltaje entre 0 y 10 voltios, que representa el valor en corriente deseado.

$c(t)$  es el valor de corriente obtenido a la salida del sistema.

$R(s)$  es la representación en el dominio de la frecuencia de  $r(t)$ .

$C(s)$  es la representación en el dominio de la frecuencia de  $c(t)$ .

$G(s)$  es la función de transferencia del sistema.

El sistema automático inicialmente busca la velocidad óptima (seleccionada), de alimentación de producto y la mantiene. Debido a cambios principalmente en la compactación del producto, la velocidad del tornillo debe cambiar para mantener la alimentación constante y una corriente constante en el motor del molino.

Por tanto el trabajo esencial del automatismo es realizar los cambios en la velocidad del tornillo para mantener la alimentación del producto constante, su trabajo se centra en realizar variaciones alrededor de una velocidad de trabajo, debido a esto se modela el sistema partiendo de una velocidad de trabajo hasta alcanzar otra. Esto se consigue de la siguiente manera:

Se pone el sistema a trabajar a una velocidad en este caso la correspondiente a 20 Hz con una entrada  $r(t) = 3.3v$ , en el variador de frecuencia y el motor entrega  $c(t) = 35,8 A$ , para luego dar un escalón a 40 Hz con  $r(t) = 6.6v$ , donde el motor alcanza una  $c(t) = 45 A$ .

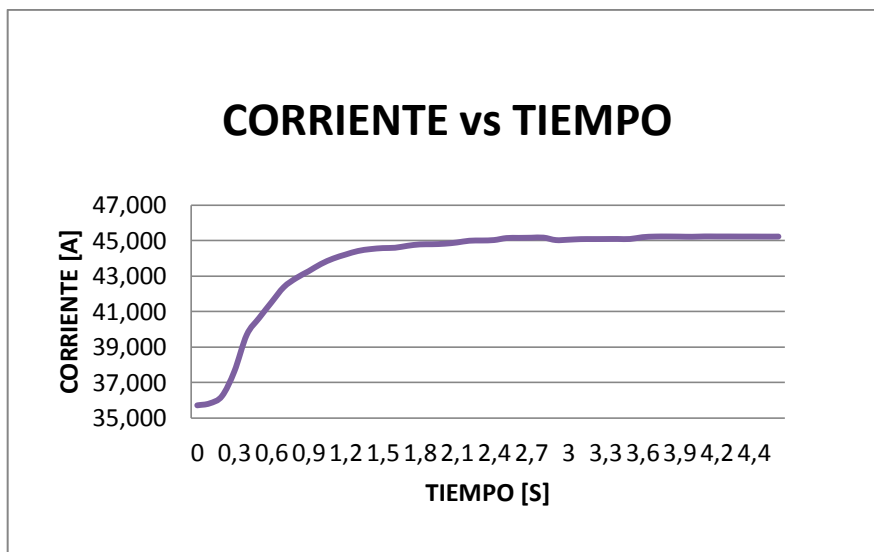
Los datos obtenidos sobre la dependencia de la corriente respecto al tiempo, cuando a la entrada se ingresa una entrada escalón de 3.3v a 6.6v, se pueden observar en la tabla 16 y su representación gráfica en la figura 32.

**Tabla 16 Datos de la respuesta de la corriente del motor del molino debido a una entrada escalón de frecuencia de 20 Hz a 40 Hz**

| <b>Tiempo (s)</b> | <b>Corriente (A)</b> | <b>Tiempo (s)</b> | <b>Corriente (A)</b> |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| 0                 | 35,710               | 2,4               | 45,034               |
| 0,1               | 35,820               | 2,5               | 45,147               |
| 0,2               | 36,230               | 2,6               | 45,158               |
| 0,3               | 37,623               | 2,7               | 45,166               |
| 0,4               | 39,684               | 2,8               | 45,173               |
| 0,5               | 40,634               | 2,9               | 45,032               |
| 0,6               | 41,518               | 3                 | 45,053               |
| 0,7               | 42,380               | 3,1               | 45,086               |
| 0,8               | 42,888               | 3,2               | 45,089               |
| 0,9               | 43,274               | 3,3               | 45,093               |
| 1                 | 43,682               | 3,4               | 45,096               |
| 1,1               | 43,992               | 3,5               | 45,094               |
| 1,2               | 44,219               | 3,6               | 45,196               |
| 1,3               | 44,417               | 3,7               | 45,231               |
| 1,4               | 44,522               | 3,8               | 45,236               |
| 1,5               | 44,581               | 3,9               | 45,229               |
| 1,6               | 44,601               | 4                 | 45,221               |
| 1,7               | 44,711               | 4,1               | 45,238               |
| 1,8               | 44,789               | 4,2               | 45,236               |
| 1,9               | 44,799               | 4,3               | 45,235               |
| 2                 | 44,828               | 4,4               | 45,233               |
| 2,1               | 44,897               | 4,4               | 45,232               |
| 2,2               | 44,997               | 4,4               | 45,229               |
| 2,3               | 45,010               | 4,4               | 45,231               |

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**





**Figura 32** Gráfica de la respuesta de la corriente del motor del molino debido a una entrada escalón de frecuencia de 20 Hz a 40 Hz

Elaborado por: Silva Franklin 2015

Para la simulación del sistema estos datos son ingresados a MatLab y utilizando el toolbox IDENT y se obtiene la función de transferencia correspondiente al sistema de molienda, la cual se puede observar en la figura 32:

$$G(s) = \frac{K_p}{(1+T_{p1}*s)(1+T_{p2}*s)}$$

$K_p = 1$   
 $T_{p1} = 0.0752$   
 $T_{p2} = 0.714$

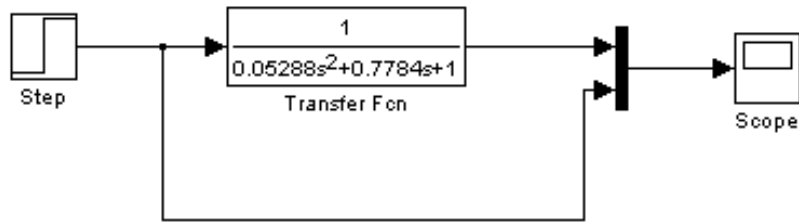
**Figura 33** Función de transferencia resultante de aplicar la función IDENT

Elaborado por: Silva Franklin 2015

Una vez obtenida la función de transferencia se procede a dividir tanto para el valor de  $T_{p1}$  como de  $T_{p2}$  para dejarla en forma normalizada igual a:

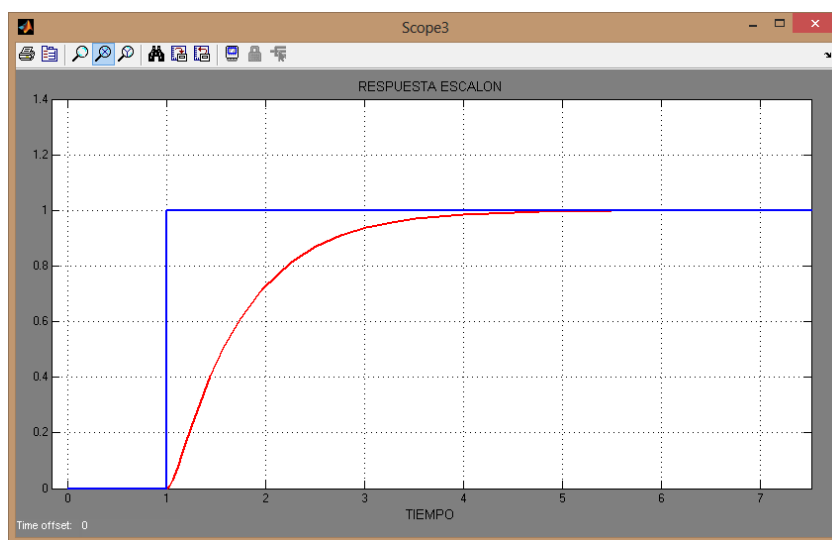
$$FT = \frac{1}{0.05288 * s^2 + 0.778 * s + 1} = \frac{18,91}{s^2 + 14.71 * s + 18.91}$$

Con la función de transferencia obtenida y con la ayuda de SIMULINK, se simula su comportamiento ante una entrada escalón, el diagrama de simulación se observa en la figura 34 y el resultado en la figura 35.



**Figura 34 Diagrama de simulación creado con SIMULINK**

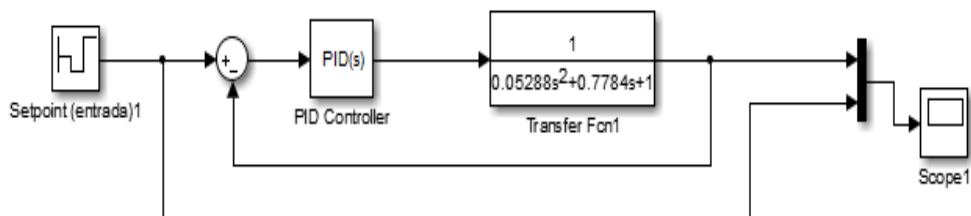
**Elaborado por: Silva Franklin 2015**



**Figura 35 Respuesta del sistema ante una entrada escalón. Línea azul: entrada escalón; Línea roja: respuesta del sistema.**

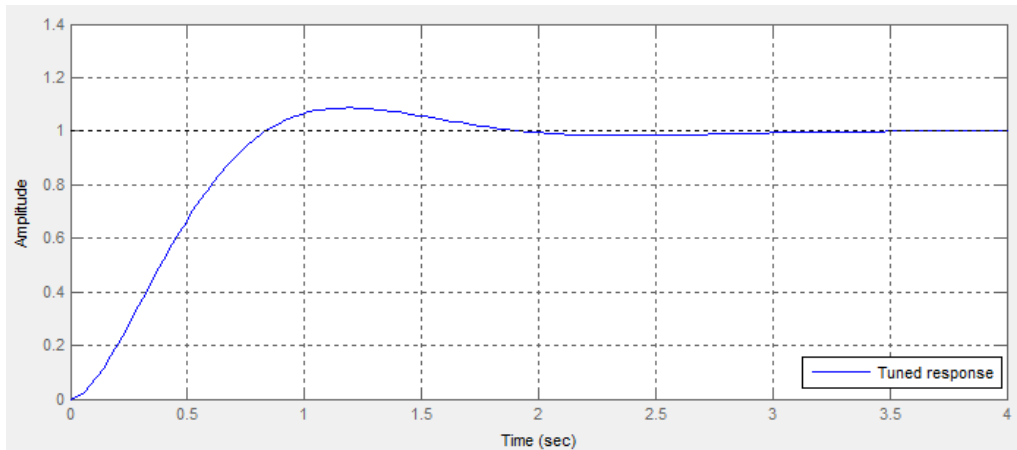
**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

Luego se incluye un controlador PID sintonizado con la función AUTOTUNING de MatLab y se introduce una función escalón, el diagrama de simulación se observa en la figura 36 y la respuesta en la figura 37.



**Figura 36 Diagrama de simulación del sistema con control PID creado con SIMULINK**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**



**Figura 37** Respuesta del sistema ante una entrada escalón.

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

Con la ayuda de MatLab se obtienen los valores de tiempo de subida, tiempo de asentamiento, sobre impulso y valor máximo.

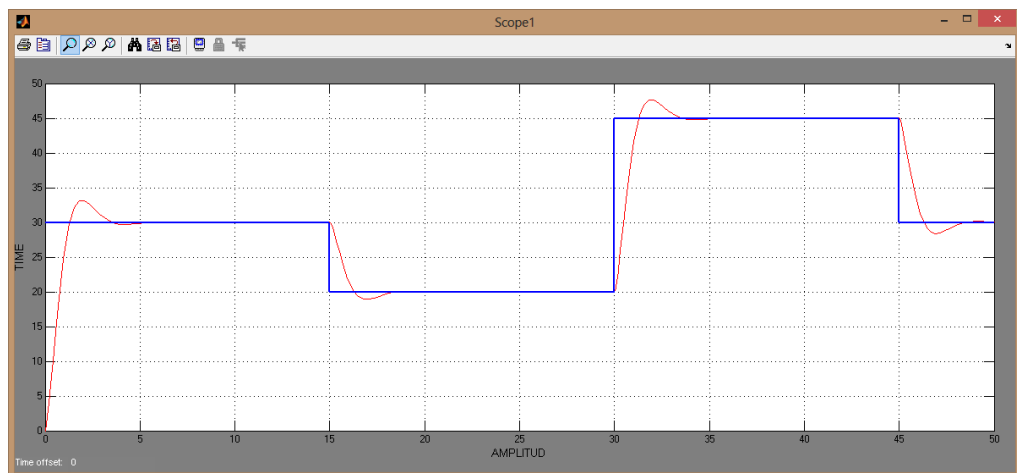
Tiempo de subida = 0.906 s

Tiempo de asentamiento 0.312 s

Sobre impulso = 10.7 %

Valor máximo = 1.11 (valor en por unidad, pu)

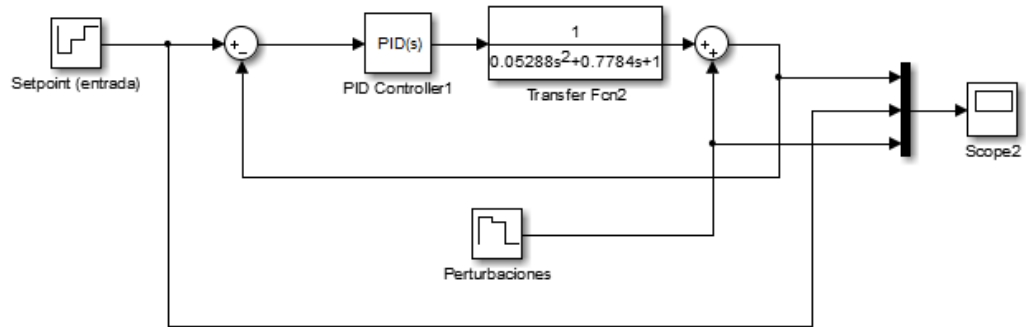
Para comprobar el funcionamiento del controlador, se introduce una entrada con varios pasos escalón para 20 A, 30 A y 45 A, lo cual se observa en la figura 38, donde también se puede ver que la respuesta sigue correctamente a la entrada.



**Figura 38** Respuesta del sistema ante una entrada con varios escalones. Línea azul: entrada escalón; Línea roja: respuesta del sistema.

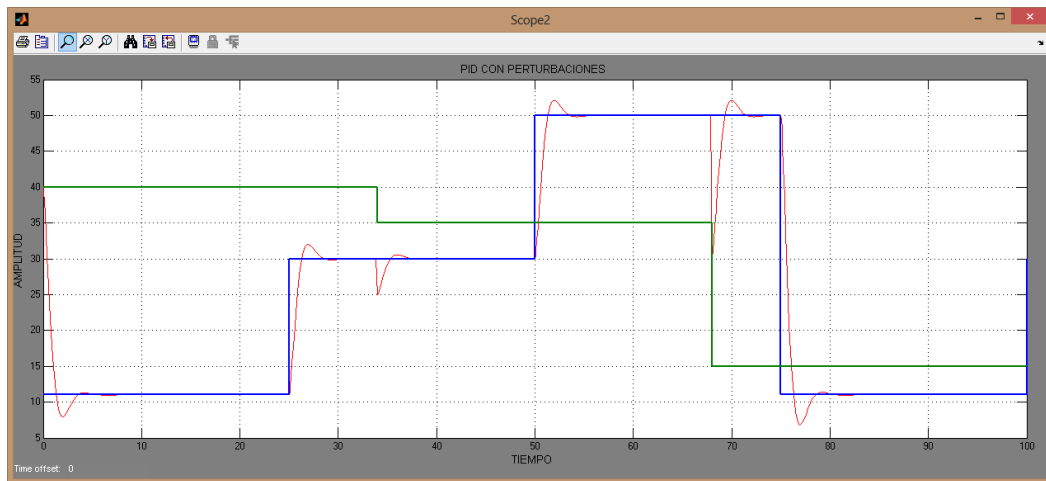
**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

Finalmente utilizando SIMULINK, se introduce una señal de perturbación para observar el comportamiento del sistema controlado con el control PID, el diagrama de simulación se observa en la figura 39 y el resultado en la figura 40.



**Figura 39 Diagrama de simulación del sistema con control PID y perturbación, creado con SIMULINK**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**



**Figura 40 Respuesta del sistema ante varios escalones incluida perturbaciones. Línea azul: entrada escalón; Línea roja: respuesta del sistema.**

**Elaborado por: Silva Franklin 2015**

En la figura 40 se observa claramente que el sistema de control propuesto actúa eficientemente ya que al aparecer perturbaciones (señal verde) provoca la corrección adecuada para que la salida (señal roja), se iguale en el menor tiempo posible a la entrada (señal azul).

#### **4.6.2. Resultados de la propuesta**

- Un controlador PID es adecuado para el control de alimentación de producto al molino de martillos pero al ser en lazo cerrado, requiere de un sistema óptimo de medición de la variable.
- El tablero del automatismo debe ser diseñado de tal manera que evite que las partículas de desecho de la molienda ingresen a él y afecten a los dispositivos instalados.
- El sistema propuesto es altamente confiable y tiene un costo adecuado, su tiempo de recuperación es inferior a los cinco meses y su inversión inicial de 2 666,98 USD.
- El sistema automático contribuye a facilitar el trabajo al operario, mejora la calidad del producto, disminuye consumo energético en 5.17 %, contribuye al medioambiente y es rentable económicamente.

#### **4.6.3. Recomendaciones de la propuesta**

- Instalar el sistema de automatización por sus múltiples beneficios.
- Dar el mantenimiento periódico y adecuado.
- Permitir el manejo y mantenimiento únicamente a personal capacitado.

## CONCLUSIONES GENERALES

- En un proceso de molienda la velocidad de alimentación de producto que ingresa al molino determina tanto el tiempo de molienda como la corriente utilizada por el motor del molino, si la velocidad es baja el tiempo es grande y la corriente es baja, en cambio cuando la velocidad es alta el tiempo es corto y la corriente utilizada es alta.
- La energía consumida depende tanto de la corriente utilizada como del tiempo que se demora el proceso, a velocidades bajas de alimentación del producto, se tiene una tendencia de consumo de energía alto debido a que el tiempo es alto, cuando la velocidad es alta la tendencia del consumo de energía se mantiene alta debido a la corriente alta, existe por tanto un punto intermedio donde la velocidad y la corriente permiten tener un consumo de energía menor que en cualquier otra condición.
- El punto de menor consumo energético coincide o es muy cercano al punto donde se obtiene la mayor cantidad de producto de calidad adecuada. Por tanto al moler en este punto, se obtiene un ahorro energético del 4,16 % y un ahorro económico apreciable, lo que influye positivamente tanto en mejoras sociales, ambientales y en la economía de la empresa.
- Un sistema automático de control de velocidad de alimentación del producto asegura que el proceso de molienda se realice en el punto de menor consumo energético.
- Los beneficios de un sistema automático son varios: contribuye a facilitar el trabajo al operario, mejora la calidad del producto, disminuye consumo energético, contribuye al medioambiente y es rentable económicamente.
- El sistema automático que se propone tiene un costo de 2 666,98 USD y un tiempo de recuperación inferior a los cinco meses.
- Con el sistema automático se puede muy fácilmente incrementar la producción aumentando sustancialmente su rentabilidad y puede disminuir el tiempo de recuperación a pocos meses.

## **RECOMENDACIONES**

- Analizar exhaustivamente las necesidades de la empresa para desarrollar un proyecto adecuado.
- Investigar suficientemente sobre las bases de la investigación antes de iniciar cualquier proyecto.
- Centrar la atención en conseguir mejoras en el consumo energético pues es la base de un manejo eficiente de la energía, que es el propósito de esta investigación, sin embargo no se puede dejar de lado las implicaciones económicas.
- Implementar el sistema automático de control de velocidad de alimentación de producto, para obtener la eficiencia energética requerida en todo tipo de proceso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACUÑA, V. (2009). El maíz y su transformación en harina. Argentina: El Cid editor.
- ALCANTARÁ, V. J. (2008). Diseño práctico de un molino de bolas. México: Instituto Politécnico Nacional.
- ASAMBLEA CONSTITUTENTE DEL ECUADOR. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Ecuador.
- BALCAZAR, E., & GUAMBA, J. (2009). Diseño de un triturador de cacao. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- BOLTON, W. (1996). *Instrumentación y Control Industrial*. Madrid: Paraninfo.
- BOTTCHEER, B. (2013). Design of industrial automation systems— Formal requirements in the engineering process. *Emerging Technologies & Factory Automation. IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS* (págs. 1-4). Cagliari: IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS.
- CAMPOS, J. (2009). Caracterización Energética: el primer paso hacia el uso racional de la energía. Argentina: El Cid Editor.
- CASTILLO, I., & FALCO, A. (2011). Higroscopicidad del romero (*Rosmarinus officinalis* L.) molido. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Vol. 21. Cuba: Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria.
- COELLO, A. (2010). Tratamiento de datos experimentales. 0-19. Loja, Loja, Ecuador: Universidad nacional de Loja.
- ESTRELA, J., & FONSECA, E. (2009). Repotenciación, construcción, montaje y pruebas de una planta de balanceado de la comunidad Valle del Anzú, provincia del Pastaza. Riobamba, Chimborazo, Ecuador: Escuela politécnica del Chimborazo.
- FERNANDEZ, C. (2009). Análisis de consumos energéticos: caso empresa Gerdau Aza S.A. Santiago de Chile. Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- GARCETE, M. O. (2014). Un análisis económico de la eficiencia energética. Argentina.
- GOLBERG, K. (2012). What Is Automation. *IEEE JOURNALS & MAGAZINES*, 1 -2, (págs. 1-2).
- GONZÁLES, MARTÑINEZ, & REYES. (2010). Una nota sobre la digestibilidad ileal e. Cuba: Instituto de Investigaciones Porcinas.
- JARAMILLO, H. (2006). Gestión energética en la industria. En ICESI, Estudios gerenciales. Colombia: Red Estudios Gerenciales.
- KULKARNI, P. (2013). Policies and Strategies for the Improvement in Energy Efficiency in Industries. *Indian Experience. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 159-163.
- MAHESWARAN, D., RANGARAJ, V., JEMBU, K., & ADITHYA, W. (2012). Energy Efficiency in Electrical Systems Electronics, Drives and Energy Systems. *IEEE International Conference on Power* (págs. 1-6). Bengaluru:: IEEE.
- NISE, N. (2011). *Control System Engineering*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- PAVÓN, A. (01 de 10 de 2013). Diseño y construcción de un molino artesanal para la molienda de granos secos de capacidad 250 kg/h. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.



- PINO, J. (2010). Ciencia y Tecnología de Alimentos, Vol 20. Cuba: Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria.
- RIVERA, F. (2009). Análisis de consumos energéticos: caso empresa Gerdau Aza S.A. Santiago de Chile. Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- VEGA, A. (2004). Guía para la elaboración de aceites comestibles, caracterización y procesamiento de nueces. Bogota, Colombia: Convenio Andrés Bello, 2004.
- VELÁSQUEZ, C. (2004). Cómo justificar proyectos de automatización. *Industrial Data*, 7-11.

## LINKOGRAFÍA

- AEDHE. (2011). *mapfre.com*. Recuperado el 12 de 09 de 2014, de [http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo\\_imagenes/grupo.cmd?path=1064391](http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1064391)
- ALFATECLIMIN. (2007). *Tecnologías Limpias en la Industria Minero-Metalurgica*. Recuperado el 20 de 01 de 2015, de [http://www.tecnologiaslimpias.cl/ecuador/ecuador\\_marcolegprodlimp.html](http://www.tecnologiaslimpias.cl/ecuador/ecuador_marcolegprodlimp.html)
- FENERGIA. (2015). *fnenergia.com.es*. Recuperado el 29 de 03 de 2015, de <http://fnenergia.com.es/services/gestion-energetica>
- GUAJARDO, J. (2012). *academia.edu*. Recuperado el 24 de 08 de 2014, de [http://www.academia.edu/7481768/06\\_Apunte\\_Molienda](http://www.academia.edu/7481768/06_Apunte_Molienda)
- INTEREMPRESAS. (2014). *interempresas.net*. Recuperado el 25 de 08 de 201, de <http://www.interempresas.net/Plastico/FeriaVirtual/Producto-Molinos-derodillos-Alpine-48410.html>
- JOHNSON, T. (2014). *eHow en español*. Recuperado el 25 de 08 de 2014, de [http://www.ehowenespanol.com/molino-rodillos-hechos\\_263433/](http://www.ehowenespanol.com/molino-rodillos-hechos_263433/)
- MACHINERY FORMATS CONSTRUCTION. (2014). *Trituradoras-deroca.com*. Recuperado el 25 de 08 de 2014, de <http://trituradoras-deroca.com/soluciones/Funcionamiento-de-molino-de-bolas.html>
- MIPRO. (16 de 04 de 2014). *MIPRO*. Recuperado el 09 de 01 de 2016, de <http://www.industrias.gob.ec/>
- QUIMINET. (2014). *QuimiNet.com*. Recuperado el 25 de 08 de 2014, de <http://www.quiminet.com/articulos/caracteristicas-de-los-molinos-de-bola->
- RADER, J. (2014). *www.jeffreyrader.es*. Recuperado el 03 de 09 de 2014, de [http://www.jeffreyrader.es/size\\_reduction/Crushers/AB\\_Hammermills.cfm](http://www.jeffreyrader.es/size_reduction/Crushers/AB_Hammermills.cfm)
- SHANGHAI, E. (2015). *Alibaba.com*. Recuperado el 01 de 04 de 2015, de <http://spanish.alibaba.com/product-gs/current-transformer-transformation-ratio-test-718478292.html>
- UNITRONICS. (2015). *unitronics.com*. Recuperado el 10 de 11 de 2015, de Unitronics: <http://www.unitronics.com/plc-hmi/micro-oplc/jazz->

## **ANEXOS**